



TUGAS AKHIR - SF 141501

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI MATERIAL AKTIF
KATODA $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ DENGAN VARIASI
DOPING ION Si ($0 \leq x \leq 0,15$)**

**Nindita Kirana
NRP 01111440000105**

**Dosen Pembimbing I
Dr. M. Zainuri, M.Si**

**Dosen Pembimbing II
Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T**

**DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



TUGAS AKHIR - SF 141501

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI MATERIAL AKTIF
KATODA $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ DENGAN VARIASI DOPING
ION Si ($0 \leq x \leq 0,15$)**

**Nindita Kirana
NRP 01111440000105**

**Dosen Pembimbing I
Dr. M. Zainuri, M.Si**

**Dosen Pembimbing II
Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T**

**DEPARTEMEN FISIKA
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - SF 141501

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ACTIVE
CATHODE MATERIAL ON $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ WITH
DOPING VARIATION Si IONS ($0 \leq x \leq 0,15$)**

**Nindita Kirana
NRP 01111440000105**

**Advisor I
Dr. M. Zainuri, M.Si**

**Advisor II
Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T**

**Department of Physics
Faculty of Science
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

LEMBAR PENGESAHAN

SINTESIS DAN KARAKTERISASI MATERIAL AKTIF KATODA $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ DENGAN VARIASI DOPING ION Si ($0 \leq x \leq 0,15$)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Material
Program Studi S-1 Departemen Fisika
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

NINDITA KIRANA

01111440000105

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Dr. Mochamad Zainuri, M.Si

NIP. 19640130199002. 1001

Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T

NIP. 19651225198701. 1001

(.....)
(.....)



SINTESIS DAN KARAKTERISASI MATERIAL AKTIF KATODA $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ DENGAN VARIASI DOPING ION Si ($0 \leq x \leq 0,15$)

Penulis : Nindita Kirana
NRP : 01111440000105
Departemen : Fisika FIA ITS
Dosen Pembimbing I : Dr. M. Zainuri, M.Si
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T

Abstrak

Material aktif katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ dengan doping ion Si $x= 0, 0,05, 0,1$, dan $0,15$ telah berhasil disintesis dengan metode solid-state reaction dengan bahan dasar komersial $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, H_3PO_4 , Fe_2O_3 , dan $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Dilakukan proses kalsinasi dengan temperature 700°C selama 2 jam dan disintering dengan temperature 900°C selama 6 jam dalam lingkungan gas inert N_2 . Hasil dari proses sintering kemudian dicoating carbon dengan perbandingan 2% wt tepung tapioka dan 8% wt asam asetat dari berat LiFePO_4 dengan pembakaran dalam temperatur 700°C selama 20 menit. Material aktif katoda dikarakterisasi melalui *X-ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscope – Electron Dispersion Xray* (SEM-EDX) pada lembaran katoda, *Cyclic Voltammetry* (CV), dan *Charge/Discharge* (CD). Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa terbentuk 100% fasa olivine LiFePO_4 . Penambahan konsentrasi doping ion Si tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kapasitas baterai. Nilai kapasitas terbesar dan performa yang baik pada sampel dengan variasi $x=0,15$. Berdasarkan uji setengah sel, kapasitas pada saat *discharging* sebesar 35, 51 mAh/g pada 0,1C dengan *cycle life* terbaik pada rentang tegangan pengujian 2,5 – 4,2 Volt.

Kata kunci : Baterai Ion Lithium, LiFePO_4 , Doping, Kapasitas Baterai

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ACTIVE CATHODE MATERIAL ON $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ WITH DOPING VARIATION Si IONS ($0 \leq x \leq 0,15$)

Name : Nindita Kirana
NRP : 01111440000105
Departement : Physics FIA ITS
Advisor 1 : Dr. M. Zainuri, M.Si
Advisor 2 : Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T

Abstract

Active cathode material of $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ with Si ion doped with $x = 0, 0,05, 0,1$, and $0,15$ has successfully synthesized by a solid-state reaction method with $\text{LiOH.H}_2\text{O}$, H_3PO_4 , Fe_2O_3 , and $\text{SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$ as the commercial materials. The materials were put in calcination temperature in Nitrogen environment at 700°C with holding time in 2 hours, then sintered at temperature 900°C in 6 hours in Nitrogen environment. The material coated by carbon from tapioca and acetic acid mixed with weight ratio 2%wt and 8%wt then burned at temperature 700°C in 20 minutes in Nitrogen environment. Characterization was performed using X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope – Electron Dispersion Xray (SEM-EDX)) on the cathode sheet, Cyclic Voltammetry (CV), and Charge/Discharge (CD). The results show that the samples has olivine phase. Si ions doped in LiFePO_4 are not significantly enhancing the specific capacity. The largest capacity and the excellent performance is in the sample with $x=0,15$. Based on half-cell testing, the sample achieve a specific discharge capacity of 35,51 mAh/g at 0,1C rate with an excellent cycle life in the usual cycling voltage range 2,5 – 4,2 Volt.

Keywords : Battery Capacity, Doping, LiFePO_4 , Li-ion Batteries

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir di departemen Fisika FIA ITS dengan judul:

“Sintesis dan Karakterisasi Material Aktif Katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dengan Variasi Doping Ion Si ($0 \leq x \leq 0,15$)”

Penulis menyadari bahwa terselesainya penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Keluarga tercinta, kedua orang tua serta adik yang selalu memberikan kasih sayang, do'a serta dukungan baik moral maupun spiritual tiada henti kepada penulis selama masa perkuliahan hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. M. Zainuri, M.Si selaku dosen pembimbing I dan Bapak Dr. Ir. Bambang Prihandoko, M.T selaku dosen pembimbing II tugas akhir dalam memberi bimbingan, wawasan, motivasi dan nasehat sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik
3. Bapak Dr. Yono Hadi P., M. Eng dan Dr. rer. nat. Eko Minarto, selaku Kepala Departemen dan Seketaris Departemen Fisika FIA ITS yang telah memberikan kemudahan sarana selama kuliah sampai terselesainya Tugas Akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Eddy Yahya, M.Sc dan Bapak Drs. M. Zainul Asrori, M.Si selaku dosen wali yang telah memberikan saran yang berhubungan dengan mata kuliah selama masa perkuliahan penulis.
5. Bapak Slamet Priyono, M.T, Bapak Achmad Subhan, M.T, dan Bapak Andi Suhandi, M.Si selaku pembimbing lapangan yang telah memberikan bimbingan, arahan, waktu, dan tenaga kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Mbak Suci Purnama Sari yang telah membantu membimbing penulis dalam hal analisis data kristalografi dan membimbing proses sintesis material Tugas Akhir ini.
7. Sahabat seperjuangan sintesis dan dalam menyelesaikan Tugas Akhir dan seluruh anggota Laboratorium Baterai Lithium P2F-LIPI Serpong.
8. Teman-teman seperjuangan, Fasya, Fachrina, Silvi, Niken, Dina, dan Unyil selalu ada saat susah maupun senang selama belajar di Fisika ITS.
9. Keluarga Antares Fisika 2014 yang selalu memberi dukungan dan motivasi serta menemani penulis selama 4 tahun belajar di Fisika ITS.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan laporan ini masih belum sempurna. Sehingga penulis meminta kritik dan saran pembaca yang dapat membantu untuk menyempurnakan laporan ini. Akhir kata semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak. Aamiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan masalah.....	3
1.5 Manfaat penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baterai	5
2.2 Baterai Sekunder	6
2.3 Baterai Ion Lithium	6
2.4 Material Katoda.....	7

2.5	Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4)	8
2.6	Lithium Iron Silicate ($\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$).....	10
2.7	Metode Solid-State Reaction	11
2.8	Bahan Pembentukan $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$	12
2.8.1	Lithium Hidroksida ($\text{LiOH.H}_2\text{O}$)	12
2.8.2	Iron (III) Oxide (Fe_2O_3)	12
2.8.3	Ortho-Phosphoric Acid (H_3PO_4).....	13
2.8.4	Silicon Dioxide ($\text{SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$)	13
2.8.5	Acetic Acid (CH_3COOH)	13
BAB III METODOLOGI		15
3.1	Peralatan dan Bahan	15
3.1.1	Peralatan.....	15
3.1.2	Bahan.....	15
3.2	Prosedur Kerja	15
3.2.1	Preparasi Komposisi Bahan Baku	15
3.2.2	Sintesis $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$	16
3.2.3	Sintesis Sel Elektroda Positif.....	16
3.3	Karakterisasi Bahan.....	17
3.3.1	X-Ray Diffraction (XRD).....	17
3.3.2	Scanning Electron Microscope (SEM)	17
3.3.3	Cyclic Voltammetry (CV)	17
3.3.4	Charge/Discharge (CD)	18
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	19
3.4.1	Sintesis Material Aktif Katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$	19

3.4.2 Pembuatan Sel Elektroda Positif	20
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Analisis Struktur Komposit $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ dengan XRD	21
4.2 Analisis Morfologi dan Persebaran Partikel dengan SEM-EDX	24
4.3 Analisis Performa Siklik dengan Cyclic Voltammetry (CV)	29
4.4 Analisis Kapasitas Muatan Spesifik dengan Charge/Discharge (CD)	33
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN A	44
LAMPIRAN B	45
LAMPIRAN C	49
LAMPIRAN D	52
LAMPIRAN E	54
LAMPIRAN F	56
BIODATA PENULIS	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Mekanisme (a) proses charging (b) proses discharging pada sel baterai ion lithium (Wieboldt, 2015).....	7
Gambar 2. 2 Fenomena konduksi pada material katoda LiFePO_4 selama proses pengisian (Park, 2010).	8
Gambar 2. 3 Struktur Kristal Olivine LiFePO_4 (Tarascon, 2001).....	10
Gambar 2. 4 Struktur kristal $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ (a) $\text{Pmn}2_1$, (b) $\text{P2}_1/\text{n}$, dan (c) Pnmb (Zhang, 2012)	11
Gambar 3. 1 Flowchart Sintesis $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$	19
Gambar 3. 2 Flowchart Sintesis Sel Elektroda Positif	20
Gambar 4. 1 Pola XRD $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ dengan $x = 0, 0,05, 0,1$, dan $0,15$	21
Gambar 4. 2 Hasil Karakterisasi SEM pada Lembaran Katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ a) $x=0$ b) $x=0,05$ c) $x=0,1$ d) $x=0,15$	24
Gambar 4. 3 Hasil EDX Mapping Sampel LiFePO_4/C	26
Gambar 4. 4 Hasil EDX Mapping Sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$...	27
Gambar 4. 5 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV LiFePO_4/C	30
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$	31
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$	32
Gambar 4. 8 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$	32

Gambar 4. 9 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD LiFePO_4/C	34
Gambar 4. 10 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$	35
Gambar 4. 11 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$	35
Gambar 4. 12 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$	36
Gambar 4. 13 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD untuk variasi x = 0, 0,05, 0,1, dan 0,15	37

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Komposisi Sampel $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dengan $x=0,00; 0,05; 0,10; 0,15$	15
Tabel 4. 1 Data Persentase dan Parameter Kisi $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$	22
Tabel 4. 2 Hasil Pencocokan Data Eksperimen Sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$ dengan Database LiFePO_4 [PDF 96-210-0917] dan $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ [PDF 96-702-1868]	23
Tabel 4. 3 Hasil Uji Cyclic Voltammetry (CV) $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{(1-x)}\text{O}_4/\text{C}$	33
Tabel 4. 4 Hasil Uji Charge/Discharge (CD) $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{(1-x)}\text{O}_4/\text{C}$	37

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	Perhitungan Komposisi Sampel
LAMPIRAN B	Penghalusan dengan Metode Rietveld Menggunakan Software Rietica
LAMPIRAN C	Data Tabel XRD
LAMPIRAN D	Hasil Pengamatan SEM-EDX
LAMPIRAN E	Hasil Uji Charge/Discharge (CD)
LAMPIRAN F	Data ICSD

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya permasalahan dalam krisis energi menjadi peluang besar untuk mengembangkan suatu piranti untuk memperbaiki kekurangan energi, baik itu pengembangan dengan menggunakan bahan alam yang ramah lingkungan, dapat digunakan terus-menerus, dan kesediaan energi terbarukan menjadi yang terpenting dalam meningkatkan kebutuhan energi manusia dan memperhatikan keselamatan lingkungan (Gong *et al.*, 2016). Perkembangan baterai memiliki dampak pada pertumbuhan dari penerapan energi. Misalnya, pada dunia otomotif untuk pengembangan kendaraan listrik, sumber energi terbarukan, dan perangkat elektronik. Pengaplikasian baterai sebagai penyimpan energi memegang peranan penting dan berbagai penelitian telah dilakukan agar dapat diimplementasikan dan digunakan dalam skala besar (Sergi *et al.*, 2016).

Baterai ion lithium telah banyak digunakan pada perangkat elektronik, misalnya handphone. Performa dan nilai dari baterai ion lithium bergantung pada material elektroda yang digunakan. Baterai ion lithium memiliki potensial yang tinggi, kapasitas spesifik yang tinggi, densitas energi dan daya spesifik yang tinggi, stabilitas siklus, dan performa yang baik (Sergi *et al.*, 2016). Secara umum, material katoda yang digunakan adalah seperti LiMnO_4 , Li_2CoO_2 , LiMPO_4 (Gong *et al.*, 2016).

Lithium Ferro Phosphate (LiFePO_4) merupakan partikel penting yang harus diperhatikan karena biayanya yang relatif murah, potensial *discharge* tinggi (kurva tegangan rerata 3,4 Volt dibanding Li/Li^+), kapasitas spesifik besar (170 mAh/gr), kestabilan termal yang baik, performa siklus yang sangat baik, keberadaan melimpah yang ramah lingkungan, dan menciptakan keamanan alam. Namun kelemahan dari material ini adalah konduktivitas listrik rendah yaitu berorde 10^{-9} S/cm dan difusi ion lithium yang lamban. Dua kelemahan tersebut

membatasi aplikasi *lithium iron phosphate* (LFP) sebagai material katoda, khususnya pada temperatur rendah dan densitas arus yang tinggi. (Innovation, 2012)

Pada penelitian ini digunakan doping ion Si pada struktur LiFePO_4 . Seperti pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Amin *et al.*, 2009) telah terbentuk kristal tunggal LiFePO_4 dengan doping Si tanpa merusak struktur LiFePO_4 . Doping ion Si menggunakan donor efek dan dapat meningkatkan konduktivitas ionik dan menurunkan konduktivitas listrik (amin, 2009). Pada penelitian yang telah dilakukan oleh (Zhao *et al.*, 2017) bahwa doping ion Si terhadap situs PO_4^{3-} dapat memperbaiki performa baterai dan elektrokimia dengan meningkatkan kapasitas spesifik baterai dan memperbaiki konduktivitas listrik dari baterai LiFePO_4 . Ion Si juga dapat meningkatkan difusi ion Li antarmuka antara butir LiFePO_4 dengan elektrolit dan memperbesar parameter kisi (Zhao, 2017).

Oleh karena itu, dilakukan penelitian lanjutan untuk mengembangkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh (Zhao, 2017) pada pembuatan $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dengan doping ion Si dengan variasi komposisi Si yang lebih besar, yaitu $x=0,00$; $0,05$; $0,10$; dan $0,15$ untuk mengetahui apakah pendopingan ion Si dapat meningkatkan performa baterai dan memperbaiki sifat elektrokimia dengan karakterisasi yang digunakan adalah *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy-Electron Dispersion Xray* (SEM-EDX), *Cyclic Voltammetry* (CV), dan *Charge/Discharge* (CD).

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan pada penelitian tugas akhir ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi doping Si pada struktur kristal material katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$?
2. Bagaimana pengaruh variasi doping Si terhadap performa baterai $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ sebagai material katoda?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi doping Si pada struktur kristal material katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$.
2. Mengetahui pengaruh variasi doping Si terhadap performa baterai $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ sebagai material katoda.

1.4 Batasan masalah

Pada penelitian tugas akhir ini, memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Bahan dasar yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, Fe_2O_3 , H_3PO_4 , $\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$, tepung tapioka, dan CH_3COOH untuk pembuatan prekursor $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$.
2. Pembuatan sampel dilakukan dengan metode solid-state reaction pada temperatur kalsinasi $700\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dan sintering $900\text{ }^\circ\text{C}$ selama 6 jam dalam lingkungan gas inert N_2 .
3. LiFePO_4 dengan doping ion Si dengan variasi komposisi doping Si $x=0,00$; $0,05$; $0,10$; dan $0,15$.
4. Serbuk hasil sintesis dicampur dengan tepung tapioka dan asam asetat dengan konsentrasi masing-masing adalah 2% dan 8% pada pembakaran dengan temperatur $700\text{ }^\circ\text{C}$ selama 30 menit untuk melakukan coating carbon secara pirolisa.
5. Sampel diuji XRD dan dianalisa fasa yang terbentuk secara kualitatif dan kuantitatif.
6. Prekursor yang digunakan untuk pembuatan sel elektroda positif adalah larutan DMAC, serbuk PVDF, serbuk Super P, dan serbuk $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$. Sedangkan substrat yang digunakan adalah lembaran Al foil.
7. Karakterisasi SEM-EDX untuk mengetahui morfologi dan persebaran partikel pada lembaran katoda serta karakterisasi CV dan CD untuk mengetahui performa baterai.

1.5 Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh variasi doping Si terhadap pembentukan material $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dalam mengetahui mikrostruktur material serta mengetahui kapasitas spesifik dan konduktivitas baterai ion lithium berbasis material katoda dalam pengembangan baterai ion lithium hemat energi ke depannya.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penulisan Tugas Akhir ini terdiri dari abstrak yang menggambarkan tentang gambaran umum dari penelitian ini. Bab I yang berisikan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan. Bab II berisikan tentang tinjauan pustaka yang berkaitan dengan dasar teori sebagai acuan dari penelitian. Bab III berisikan tentang metodologi penelitian tugas akhir. Bab IV berisikan tentang hasil penelitian dan pembahasannya. Dan Bab V berisikan tentang kesimpulan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai

Baterai adalah suatu piranti yang mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik melalui proses elektrokimia reaksi reduksi-oksidasi (redoks). Proses pengisian baterai terjadi melalui proses bolak-balik dimana terjadi transfer elektron dari satu material ke material lain dalam sirkuit listrik. Suatu baterai terdiri dari satu atau lebih sel yang bergantung pada tegangan output dan kapasitasnya. Satu sel baterai terdiri dari :

1. Anoda atau elektroda negatif, yaitu melepaskan elektron ke rangkaian terluar dan mengalami proses oksidasi pada proses elektrokimia.
2. Katoda atau elektroda positif, yaitu menerima elektron dari rangkaian luar dan mengalami proses reduksi pada proses elektrokimia.
3. Elektrolit, yaitu medium tempat terjadinya transfer ion dalam proses charging antara anoda dan katoda. (Koontz and Lucero, 2002)

Baterai dikelompokkan menjadi dua yaitu baterai primer dan baterai sekunder, pengelompokan tersebut berdasarkan kemampuan baterai untuk melakukan pengisian ulang (*recharge*). Baterai primer tidak memiliki kemampuan untuk mengisi ulang energi, sehingga baterai ini hanya dapat digunakan sekali pakai. Baterai sekunder adalah baterai yang memiliki kemampuan *recharge*. Prinsip kerja baterai ini sama seperti baterai primer, namun ketika diberi beban dari luar akan terjadi reaksi yang berkebalikan dengan reaksi pada saat *discharge* dimana elektron-elektron akan mengalir dari kutub positif ke kutub negatif (Koontz and Lucero, 2002)

2.2 Baterai Sekunder

Baterai Sekunder adalah baterai yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) yang mengkonversikan energi listrik menjadi energi kimia. Baterai sekunder terdiri dari sel galvanic selama pengosongan muatan (*discharge*) dan sel elektrolit selama pengisian muatan (*charge*) (Klink, 2013). Baterai ini, memiliki power density yang tinggi, *discharge rate* yang tinggi, dan memiliki performa yang baik dalam temperatur rendah (Prabhush, 2014).

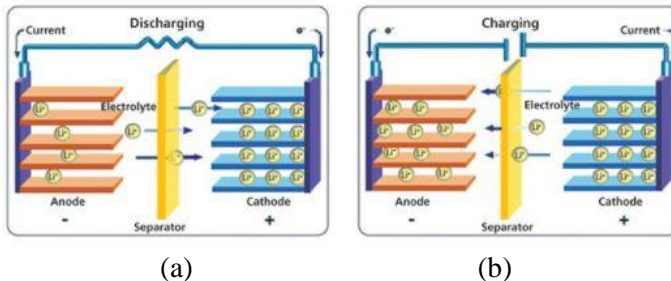
Baterai sekunder diaplikasikan dalam dua kategori, yaitu :

- a. Sebagai alat penyimpan energi/ *Energy-storage Device*. Umumnya baterai jenis ini tersambung dengan jaringan listrik primer saat digunakan. Contoh penggunaannya adalah dalam otomotif, pesawat terbang.
- b. Sebagai sumber energi listrik pada portabel divais, pengganti baterai primer dan pada semua divais yang menggunakan baterai primer, seperti telephone genggam, kamera, notebook dan lain-lain.(Abbas,1997)

2.3 Baterai Ion Lithium

Baterai ion lithium mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik. Ion lithium berdifusi dan bereaksi dengan material-material yang berada didekatnya. Baterai berbasis lithium cukup menjanjikan karena memiliki densitas tinggi, beda tegangan tinggi, *life time* lama, *no memory effect*, ramah lingkungan, *specific energi*, kepadatan energi tinggi, dan *power density* yang tinggi dibandingkan dengan jenis *rechargeable battery* yang lain (Zhu, 2013). Baterai ion lithium terdiri dari komponen katoda, anoda, separator, dan elektrolit. Atom-atom lithium akan berdifusi dari elektroda dengan potensial yang tinggi (katoda) ke elektroda dengan potensial rendah (anoda). Elektrolit adalah material yang menjadi penghubung reaksi yang memungkinkan terjadinya transfer ion antara anoda dan katoda. Ketika proses

discharging, ion-ion lithium berdifusi keluar dari anoda melewati elektrolit menuju katoda. Sedangkan, electron mengalir sepanjang sirkuit eksternal dari anoda menuju katoda (Zhao, 2012). Proses pengisian atau *charging* merupakan peristiwa aliran elektron dari sumber tegangan mengalir dari katoda ke anoda. Elektron yang diberikan akan bergerak melalui rangkaian luar menuju anoda. Pada kondisi *charging* katoda akan menjadi lebih negatif dan anoda menjadi lebih positif sehingga kation akan bergerak menuju ke kutub negatif, sebaliknya anion akan bergerak ke kutub positif. Untuk kesetimbangan muatan, material katoda akan terionisasi menghasilkan ion lithium bermuatan positif (Li^+) dan bermigrasi ke dalam elektrolit menuju komponen anoda. Ion lithium akan masuk ke dalam anoda melalui mekanisme interkalasi. Pada saat proses ini, baterai akan menyimpan energi kimia (Topracki, 2010). Proses *charging-discharging* diilustrasikan pada Gambar 2.1.

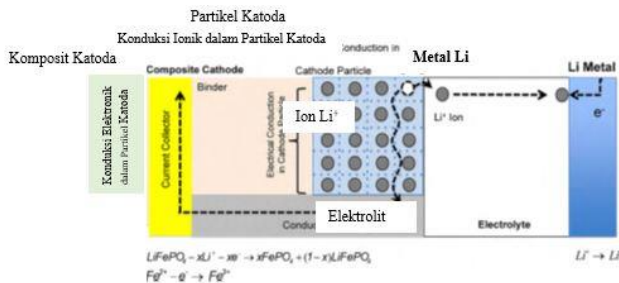


Gambar 2. 1 Mekanisme (a) proses charging (b) proses discharging pada sel baterai ion lithium (Wieboldt, 2015)

2.4 Material Katoda

Material katoda merupakan komponen yang penting dalam pembuatan sel baterai khususnya pada baterai ion litium. Dimana material katoda menjadi acuan dalam menghitung kapasitas sel baterai secara teoritik. Untuk setiap berat material katoda, jumlah ion litium yang dilepaskan

material katoda saat *charging* dan jumlah ion litium yang kembali waktu tertentu ke material katoda saat *discharging* menggambarkan densitas energi dan densitas power sel baterai. Semakin banyak ion litium yang dipindahkan dari katoda ke anoda maka semakin besar pula densitas sel baterai. Semakin banyak ion litium yang kembali ke katoda dari anoda tiap detiknya, maka semakin besar densitas powernya. Fenomena perpindahan ion ini disebut juga dengan *charge transfer* atau transfer muatan. Sehingga performa pada sel baterai sangat bergantung pada kondisi transfer muatan atau *charge transfer*. Mekanisme ini berkaitan erat dengan proses difusi dan konduktivitas elektronik serta ionik dari komponen pembentuk sel baterai (Park, 2010).



Gambar 2. 2 Fenomena konduksi pada material katoda LiFePO₄ selama proses pengisian (Park, 2010).

2.5 *Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)*

LiFePO₄ merupakan salah satu material katoda berbasis material fosfat dalam bentuk LiMPO₄ (M = Fe, Co, Mn, dan Ni). LiFePO₄ memiliki tegangan rata-rata 3,4 Volt (vs. Li/Li⁺). Material katoda LiFePO₄ memiliki kestabilan termal dan siklus hidup yang baik, ramah lingkungan, biaya produksi yang murah, dan memiliki kapasitas teoritik yang tinggi sebesar 170 mAh/g. Namun, dibalik kelebihanannya, LiFePO₄ memiliki konduktivitas listrik dan ionik yang rendah (10⁻⁹ S cm⁻¹) dan difusivitas Li⁺ (10⁻¹⁴ cm² s⁻¹) yang rendah

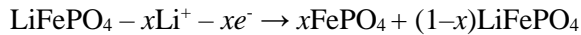
pada temperatur ruang yang mempengaruhi performa elektrokimia baterai (Zhao,2017).

Untuk memperbaiki performa elektrokimia LiFePO_4 , antara lain:

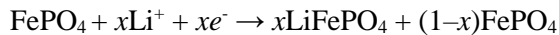
1. *Carbon coating* untuk meningkatkan konduktivitas listrik dengan menambahkan bahan aditif pada saat proses sintesis LiFePO_4/C . Selain itu, *carbon coating* juga dapat menghindari penggumpalan dari nano partikel dan mempercepat jalannya ion lithium (Satyavani, 2015).
2. Mengontrol ukuran partikel dan pertumbuhan polikristalin homogen dengan mereduksi ukuran partikel dan meningkatkan luas permukaan sebagai solusi dari hilangnya kapasitas baterai ion lithium pada saat charging dan discharging (Padhi, 1997). Mereduksi ukuran partikel dapat memperpendek jarak difusi ion Li^+ .
3. Doping dengan kation ke dalam ion Li^+ dapat menurunkan waktu difusi, meningkatkan sifat transportasi ion (Amin, 2009), dan meningkatkan konduktivitas listrik (Satyavani, 2015).

LiFePO_4 tipe olivine memiliki struktur kristal orthorhombik dengan space group Pnma yang terdiri dari kerangka oksigen dalam bidang hexagonal-closed-packed (HCP) dimana Li dan Fe pada situs oktahedral dan P pada situs tetrahedral. Atom besi yang berada ditengah-tengah enam atom oksigen yang membentuk struktur oktahedron FeO_6 berada pada bidang $b\ c\ <1\ 1\ 0>$ dan rantai linear LiO_6 oktahedral yang paralel terhadap sumbu- $b\ <0\ 1\ 0>$ yang terhubung bersama dengan PO_4 tetrahedral yang membentuk struktur tiga dimensi yang stabil (Zaghib, 2015). LiFePO_4

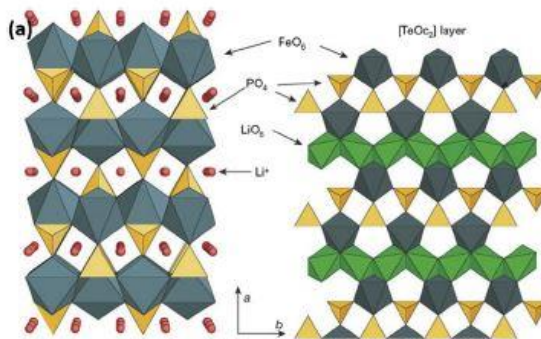
memiliki parameter kisi $a = 10,33 \text{ \AA}$, $b = 6,01 \text{ \AA}$, $c = 4,69 \text{ \AA}$, dan $V = 291.17 \text{ \AA}^3$. Saat pelepasan ion Li, LiFePO_4 menjadi FePO_4 tanpa adanya perubahan struktur kristal (Satyavani, 2015). Saat proses pelepasan ion Li atau saat proses *charge*, reaksi kimianya dapat dituliskan



dan saat proses *discharge* terjadi reaksi



(Satyavani, 2015)

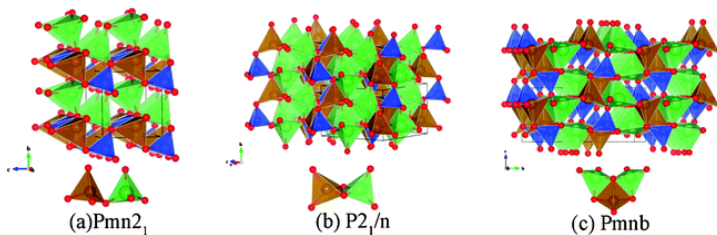


Gambar 2. 3 Struktur Kristal Olivine LiFePO_4 (Tarascon, 2001)

2.6 *Lithium Iron Silicate* ($\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$)

Sedangkan material katoda $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ memiliki kapasitas teoritik yang lebih tinggi dari LiFePO_4 , yaitu 330 mAh/g. Struktur kristal $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ dengan struktur kristal olivine dapat digolongkan menjadi dua golongan fasa kristal berdasarkan struktur simetri dan keberadaan atomnya, yaitu orthorhombik dengan space group $\text{Pmn}2_1$ dan monoklinik dengan space group $\text{P}2_1$ (Lu, 2016). $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ memiliki kerangka ion lithium dalam tetrahedral dengan Li, Fe dan Si terletak pada pusat tetrahedral yang terbentuk dari 4 atom

oksigen (Araujo, 2013). bentuk tetrahedral $\text{FeO}_4\text{-SiO}_4$ berada sepanjang sumbu b pada fasa P2_1 dan sumbu c pada fasa $\text{Pmn}2_1$. Untuk fasa orthorhombik memiliki parameter kisi $a = 6,287 \text{ \AA}$, $b = 5,395 \text{ \AA}$, $c = 4,958 \text{ \AA}$, dan $V = 168,162 \text{ \AA}^3$. Sedangkan untuk fasa monoklinik memiliki parameter kisi $a = 8,327 \text{ \AA}$, $b = 5,093 \text{ \AA}$, $c = 8,297 \text{ \AA}$, dan $V = 347,530 \text{ \AA}^3$ (Lu, 2016).



Gambar 2. 4 Struktur kristal $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ (a) $\text{Pmn}2_1$, (b) $\text{P2}_1/\text{n}$, dan (c) Pnmb (Zhang, 2012)

2.7 Metode *Solid-State Reaction*

Metode reaksi *solid-state* terdiri dari sintesis *solid state*, aktivasi *mechano-chemical*, dan reduksi *carbo-thermal*. Sintesis *solid state* dilakukan untuk membentuk struktur kimia yang reaksinya dilakukan pada kondisi ekstrim seperti pada tekanan dan temperature yang tinggi. Metode ini adalah metode yang sederhana dan dapat digunakan pada bidang industri. Prosedur yang panjang memerlukan penggilingan (*grinding*) untuk mereduksi ukuran kristal berulang-ulang dan proses kalsinasi membentuk partikel berukuran besar dengan performa elektrokimia yang rendah. Sintesis menggunakan metode *solid state* dilakukan dengan mencampur semua prekursor pembentuk partikel LiFePO_4 dengan teknik ball milling. Teknik ball milling ada 2, yaitu *dry milling* dan *wet milling* menggunakan pelarut. Setelah proses ball milling, prekursor LiFePO_4 dikalsinasi. Proses kalsinasi dapat melalui satu tahap atau dua tahap kalsinasi. Pada tahap pertama, proses kalsinasi dilakukan pada temperatur rendah (250-350

°C) dan dilanjutkan pada tahap kedua pada temperatur tinggi 400-800 °C pada lingkungan inert (Satyavani, 2015). Proses kalsinasi dapat mempengaruhi struktur kristal, ukuran partikel, dan kapasitas discharge LiFePO_4 (Chen, 2008).

2.8 Bahan Pembentukan $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$

2.8.1 *Lithium Hidroksida* ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$)

Lithium merupakan logam padatan paling ringan, lunak, dan memiliki titik leleh yang rendah serta bersifat reaktif. Karakteristik dari logam lithium adalah konduktivitas yang termal yang tinggi, kapasitas kalor yang tinggi, dan viskositas yang rendah. Lithium dapat bereaksi dengan oksigen membentuk monoksida dan peroksida. Oleh karena itu, lithium mudah bereaksi dengan air dan tidak dapat terbebas di alam karena sifat reaktifnya.

Lithium hidroksida merupakan senyawa anorganik, bersifat higroskopis, dan tersedia secara komersial dalam bentuk anhidrat dan monohidrat yang merupakan basa kuat. Reaksi dari senyawa ini berlangsung lambat diantara hidroksida logam alkali yang lain (Wikipedia). Lithium Hidroksida dihasilkan dengan mereaksikan lithium karbonat (Li_2CO_3) dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Senyawa ini biasa digunakan sebagai media perpindahan panas (Wikipedia), penyimpanan elektrolit pada baterai, katalisator, dan industri keramik.

2.8.2 *Iron (III) Oxide* (Fe_2O_3)

Besi (III) oksida memiliki fase hematite dan bersifat ferromagnetik. Hematite mengkristalisasi dalam bentuk rhombohedral dengan titik lebur 1566 °C. Hematite merupakan mineral berwarna merah kecoklatan. Hematite dihasilkan dari pemanasan besi (II) oksida pada temperatur diatas 500 °C (Wikipedia).

2.8.3 *Ortho-Phosphoric Acid* (H_3PO_4)

Asam fosfat merupakan salah satu dari mineral inorganik dan termasuk ke dalam golongan asam lemah. Asam fosfat memiliki konjugat dari fosfat, yaitu PO_4^{3-} dan berbentuk padatan pada temperatur dan tekanan ruangan. Biasa digunakan sebagai bahan aditif makanan, elektrolit, bahan baku pupuk, dan sebagainya. Larutan asam fosfat bersifat korosif, tidak berwarna, tidak berbau, dan non volatile (Wikipedia).

2.8.4 *Silicon Dioxide* ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Silika dioksida banyak ditemukan di alam sebagai pasir alam atau kuarsa. Pada sebagian besar silikat memiliki struktur tetrahedral dengan empat atom O yang mengelilingi atom Si. Titik leleh dari senyawa ini adalah 1.713 oC dengan fasa amorf. Silika dioksida banyak digunakan sebagai bahan baku keramik, kaca, dan bahan aditif makanan (Wikipedia).

2.8.5 *Acetic Acid* (CH_3COOH)

Asam asetat merupakan senyawa kimia organik yang tidak berwarna, berbau menyengat, dan tergolong dalam asam lemah. Senyawa ini banyak digunakan sebagai bahan baku industri, bahan baku makanan, dan sebagainya. Asam asetat memiliki titik leleh pada temperatur 392 K dan dapat larut dalam air.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1 Peralatan dan Bahan

3.1.1 Peralatan

Dalam penelitian tugas akhir ini peralatan yang digunakan adalah *beaker glass*, mortar, *chamber*, *crucible*, spatula, timbangan *digital*, ayakan 400 mesh, *furnance* gas inert, *planetary ball mill*, *hotplate*, *stirrer*, *doctor blade*, pisau *doctor blade*, gunting, *casing coin cell*, *glove box*, pipet tetes.

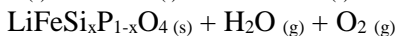
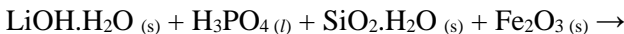
3.1.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah serbuk LiOH.H₂O (teknis), serbuk Fe₂O₃ (teknis), larutan H₃PO₄ (merck), serbuk SiO₂.H₂O (merck), larutan CH₃COOH (asam asetat) (teknis), larutan DMAc (merck), serbuk PVDF (teknis), serbuk Super P (merck), larutan elektrolit LiPF₆, lembaran Li *Metallic*, lembaran separator, lembaran Al foil, dan acetone.

3.2 Prosedur Kerja

3.2.1 Preparasi Komposisi Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan ditentukan sesuai dengan perhitungan stoikiometri (lihat pada lampiran). Berikut ini adalah komposisi bahan baku yang dapat dilihat dalam bentuk tabel.



Tabel 3. 1 Komposisi Sampel LiFeSi_xP_{1-x}O₄ dengan x=0,00; 0,05; 0,10; 0,15

x	LiOH.H ₂ O		H ₃ PO ₄		SiO ₂ .H ₂ O		Fe ₂ O ₃	
	Hitung (gram)	Ukur (gram)	Hitung (mL)	Ukur (mL)	Hitung (gram)	Ukur (gram)	Hitung (gram)	Ukur (gram)
0	3,9885	3,9885	6,41	6,4	0	0	7,5952	7,5976
0,05	3,9922	3,9923	6,09	6,1	0,3715	0,3715	7,5995	7,5995
0,1	3,9957	3,9968	5,77	5,8	0,7438	0,7441	7,6062	7,6062

0,15	3,9995	3,9995	5,46	5,5	1,1167	1,1169	7,6149	7,6144
------	--------	--------	------	-----	--------	--------	--------	--------

3.2.2 Sintesis $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$

Metode yang digunakan dalam sintesis ini adalah metode *solid-state reaction*. Bahan-bahan seperti $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, Fe_2O_3 , H_3PO_4 , $\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ dengan stoikiometri masing-masing dengan variasi komposisi Si $x=0,00$; $0,05$; $0,10$; dan $0,15$ dicampur dan digerus menggunakan mortar hingga halus dan dilarutkan menggunakan H_3PO_4 . Kemudian, sampel dikalsinasi dalam lingkungan gas inert N_2 pada temperatur $700\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Selanjutnya, hasil yang sudah dikalsinasi dimilling selama 2 jam dengan kecepatan 1200 rpm dengan metode dry milling. Pada proses ini, rasio perbandingan prekursor dengan bola zirkon adalah 1:10. Setelah itu, sampel disintering pada temperatur $900\text{ }^\circ\text{C}$ selama 6 jam dalam lingkungan gas inert menggunakan furnace. Kemudian, dilakukan pengcoatingan karbon menggunakan sumber karbon dari larutan CH_3COOH (asam asetat) dan tepung tapioka dengan pemanasan dalam temperatur $700\text{ }^\circ\text{C}$ selama 20 menit. Setelah itu dilakukan karakterisasi XRD.

3.2.3 Pembuatan Sel Elektroda Positif

Pada proses ini dilakukan proses pembuatan sel. Untuk langkah awal, dilakukan proses pencampuran prekursor $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dengan DMAC, PVDF, dan Super P dengan perbandingan untuk $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$: PVDF : Super P adalah $85 : 10 : 5$. Disini fungsi dari Super P adalah sebagai bahan elektroda nya atau bahan konduktifnya. Sedangkan PVDF adalah sebagai pengikat dan DMAC sebagai pelarut. Massa $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ yang digunakan adalah sebanyak 2 gram dan jumlah DMAC adalah sebanyak 3,4 ml untuk 4 sampel dengan variasi komposisi Si $x=0,00$; $0,05$; $0,10$; dan $0,15$. Pertama, DMAC dipanaskan menggunakan *hotplate* selama 15 menit. kemudian, PVDF dilarutkan ke dalam DMAC secara perlahan menggunakan *magnetic stirrer*

selama 20 menit hingga larut sempurna dan didiamkan selama 10 menit. Lalu, ditambahkan super P sedikit demi sedikit hingga larut untuk menghomogenkan larutan dengan terus diaduk selama 10 menit. Setelah itu, ditambahkan serbuk prekursor $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ ke dalam *slurry* selama 30 menit. Setelah terbentuk *slurry*, lalu dilakukan pembuatan lapisan katoda dengan melapiskan *slurry* ke lembaran Al *foil* di dalam dies dengan ukuran Al *foil* seukuran dengan ukuran dies. Ketebalan yang digunakan sebesar 200 mikron kemudian dikeringkan selama 1 jam dengan temperature 81 °C. Setelah itu, dilakukan pembuatan *coin cell* untuk di uji performa baterai untuk mengetahui nilai konduktivitas dan kapasitasnya. Pembuatan *coin cell* ini dilakukan untuk coin ½ cell dilakukan di dalam glove box dalam keadaan vakum. Setelah itu dilakukan pengujian SEM-EDX, CV, dan CD.

3.3 Karakterisasi Bahan

3.3.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi XRD dilakukan untuk menganalisis komposisi fasa bahan. Panjang gelombang yang digunakan adalah Cu K- α_1 . Pada penelitian ini, untuk menganalisis fasa $\text{LiFe}_{1-x}\text{Si}_x\text{PO}_4$ menggunakan sudut dari 10° – 80°. Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI Serpong dan Departemen Teknik Material FTI ITS.

3.3.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

Karakterisasi SEM dilakukan untuk mengidentifikasi morfologi material aktif $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dalam bentuk lembaran. Pengujian dilakukan di Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI Serpong.

3.3.3 Cyclic Voltammetry (CV)

Pengujian Cyclic Voltammetry dilakukan untuk mempelajari reaksi reduksi dan oksidasi (redoks) yang dilakukan di Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI Serpong. Pengujian dilakukan menggunakan alat WBCS 3000 dengan

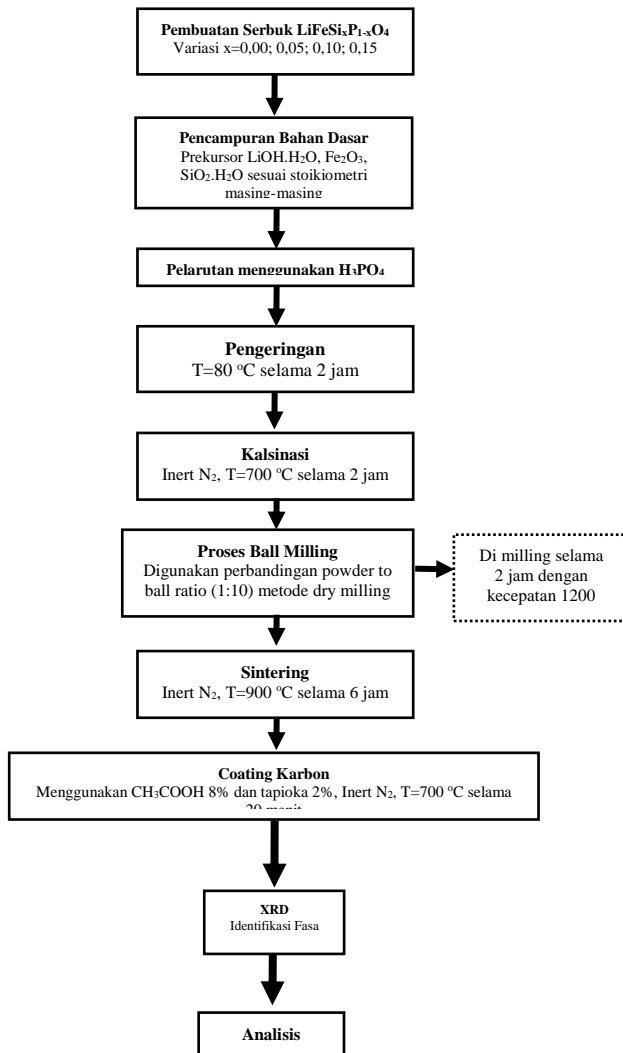
pemberian scan rate sebesar $50 \mu\text{Vs}^{-1}$ dengan rentang tegangan cut off 2,5 – 4,2 Volt.

3.3.4 *Charge/Discharge (CD)*

Pengujian Charge/Discharge dilakukan dengan proses charging dan discharging untuk mengetahui besar kapasitas pada sel baterai menggunakan alat WBCS 3000 dengan scan rate yang diberikan 0,1C dilakukan di Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI Serpong.

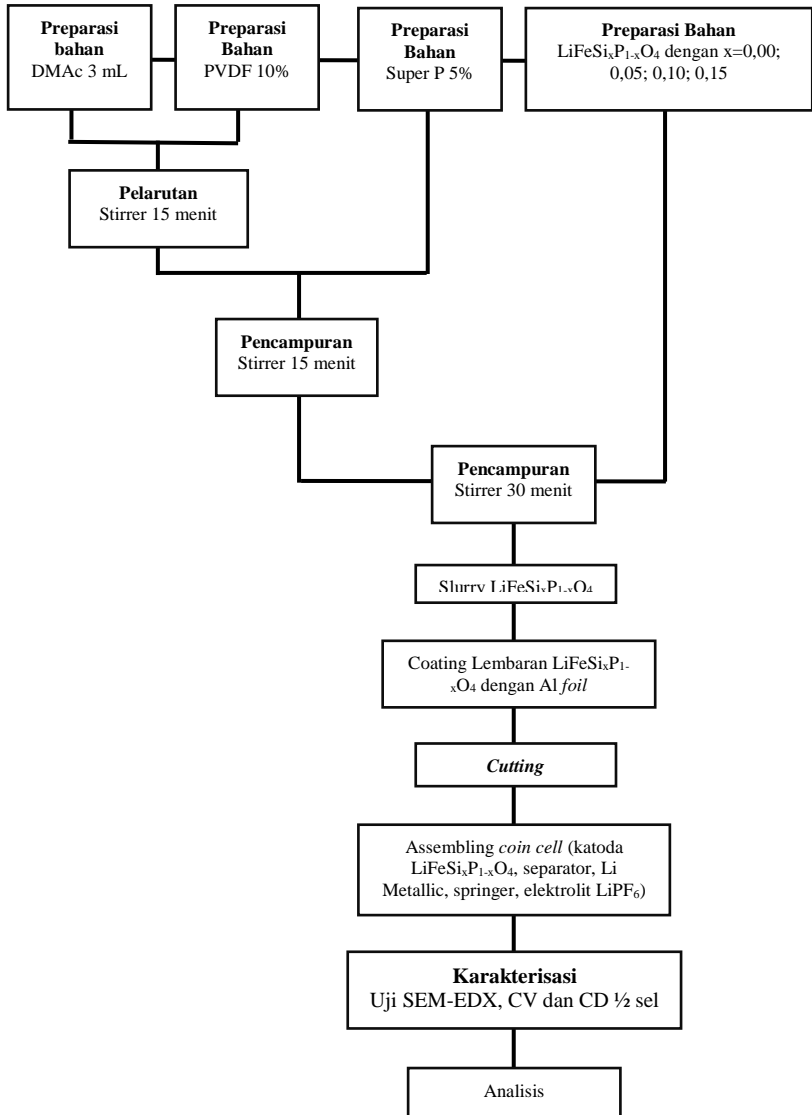
3.4 Diagram Alir Penelitian

3.4.1 Sintesis Material Aktif Katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$



Gambar 3. 1 Flowchart Sintesis $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$

3.4.2 Pembuatan Sel Elektroda Positif



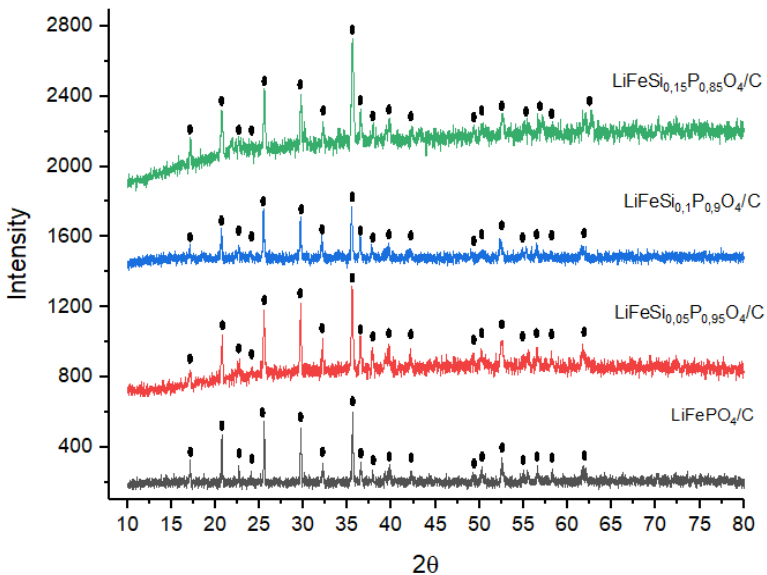
Gambar 3. 2 Flowchart Sintesis Sel Elektroda Positif

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Struktur Komposit $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ dengan XRD

Hasil dari karakterisasi XRD material aktif katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ dengan variasi doping ion Si terhadap struktur LFP/C dilakukan pada $x = 0, 0,05, 0,1$, dan $0,15$ dianalisis secara kualitatif dan kuantitatif untuk mengetahui fasa-fasa yang terbentuk. Pada pengujian, rentang sudut yang diberikan dari sudut $10^\circ - 80^\circ$. Proses identifikasi fasa yang diduga sebagai struktur LFP secara kualitatif dilakukan menggunakan *software Match!3* dengan pencocokan posisi-posisi puncak yang terukur dengan database dalam bentuk PDF.



Gambar 4. 1 Pola XRD $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ dengan $x = 0, 0,05, 0,1$, dan $0,15$

Pada gambar 4.1 dapat diamati bahwa hasil sintesis material aktif katoda LFP/C dengan doping ion Si pada $x = 0$,

0,05, 0,1, dan 0,15 telah berhasil. Keempat pola difraksi tersebut menunjukkan terbentuknya fasa olivine berdasarkan database [PDF 96-210-0917]. Selanjutnya, dilakukan analisis secara kuantitatif dengan metode *Rietveld* menggunakan *software Rietica*. Dari hasil pengolahan menggunakan *software Rietica*, dapat diketahui persentase komposisi fasa dan nilai parameter kisi masing-masing sampel. Analisa dilakukan menggunakan kode CIF 2100916 untuk fasa olivine LiFePO_4 . Hasil analisa menggunakan *software Rietica* ditunjukkan pada table 4.1.

Tabel 4. 1 Data Parameter Kisi dan Volume Kristal $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$

x	Kisi LiFePO_4			V (\AA^3)
	a (\AA)	b (\AA)	c (\AA)	
0	10,330	6,005	4,691	291,042
0,05	10,349	6,016	4,700	292,655
0,1	10,369	6,020	4,719	294,683
0,15	10,338	6,003	4,690	291,135

LiFePO_4/C telah berhasil disintesis menggunakan metode *solid-state reaction* dengan didoping ion Si^{4+} . Doping ion Si^{4+} dilakukan pada ion P dimana keduanya memiliki ukuran dimensi dan konfigurasi elektron yang hampir sama. Jari-jari atom ion Si^{4+} sebesar 0,040 nm dan ion P sebesar 0,031 nm. Berdasarkan pola difraksi pada gambar 4.1 dapat diamati bahwa fasa yang terbentuk antara sampel LFP/C di doping ion Si memiliki fasa yang sama dengan fasa LFP/C. Hal ini menunjukkan bahwa proses pendopingan ion tidak memengaruhi struktur olivine LiFePO_4/C namun, hanya terjadi pergeseran posisi puncak difraksi ke arah kiri antara yang didoping ion Si dengan LFP/C karena ukuran dimensi kristal ion Si lebih besar daripada ion P yang dapat diamati dari perubahan parameter kisi yang disajikan dalam table 4.1.

Berdasarkan pada penelitian sebelumnya (Zhao, 2017), pada sampel LFP/C tanpa doping memiliki space group Pnma dengan parameter kisi $a = 10,324 \text{ \AA}$ $b = 6,0054 \text{ \AA}$ dan $c =$

4,6914 Å dengan Volume unit sel sebesar 290,8910 Å³. Pada tabel 4.1, secara keseluruhan sintesis LFP/C dengan doping ion Si $x = 0, 0,05, 0,1, \text{ dan } 0,15$ mengalami perubahan parameter kisi yang menunjukkan bahwa proses pendopongan telah berhasil. Semakin besar konsentrasi ion Si⁴⁺ maka semakin besar parameter kisinya. Perubahan parameter kisi berpengaruh terhadap volume sel masing-masing sampel. Tetapi, terjadi peyusutan ukuran dimensi kristal pada variasi $x=0,15$. Perubahan dimensi kristal ini diakibatkan oleh beberapa factor, antara lain temperatur, *holding time*, dan proses pendopongan yang belum sempurna.

Bila diamati pada gambar 4.1 fasa olivine LiFePO₄ terbentuk 100% pada puncak-puncak difraksi yang diamati. Selain itu, terdapat fasa Li₂FeSiO₄ yang memiliki posisi puncak yang sama dengan beberapa puncak difraksi yang dimiliki fasa olivine LiFePO₄ walaupun intensitasnya berbeda. Pada hal ini, fasa Li₂FeSiO₄ tidak berperan sebagai impuritas namun, dapat diindikasikan bahwa pada posisi puncak difraksi tertentu material ini dapat berperan sebagai LiFePO₄ atau Li₂FeSiO₄ akibat pendopongan ion Si.

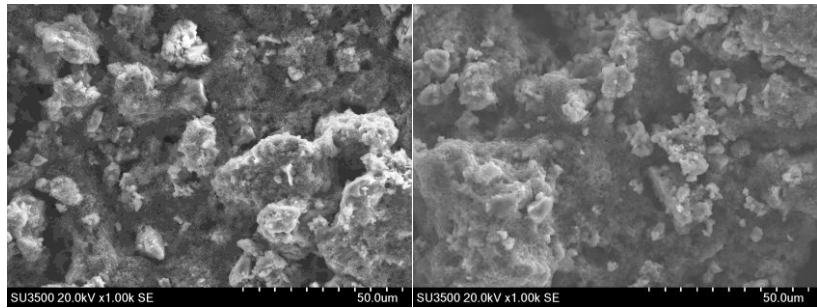
Tabel 4. 2 Hasil Pencocokan Data Eksperimen Sampel LiFeSi_{0,05}Po_{0,95}O₄/C dengan Database LiFePO₄ [PDF 96-210-0917] dan Li₂FeSiO₄ [PDF 96-702-1868]

eksperimen			LiFePO ₄		Li ₂ FeSiO ₄	
2θ	d	I/Io	d	I/Io	d	I/Io
17.1519	5.1699	15.07	5.166	28.62		
20.7521	4.28041	62.83	4.2721	52.45		
22.7206	3.91382	15.23	3.9176	14.54	3.8976	1.41
24.1099	3.69134	7.62	3.6984	5.87		
25.5326	3.4888	85.97	3.482	78.55		
29.6883	3.00923	96.76	3.0072	66.09		
32.178	2.78186	38.9	2.7764	26.37		
35.5719	2.52384	100	2.5204	100		

36.4909	2.46236	43.48	2.4579	16.17	2.4614	4
37.8128	2.37926	20.47	2.3731	18.86	2.3778	6.49
39.7717	2.26648	24.58	2.2628	23.78	2.2546	0.78
42.1832	2.14233	14.97	2.1381	17.07		
49.1228	1.85469	11.94	1.8492	8.11		
50.2504	1.81569	17.6	1.8138	15.96	1.8144	1.5
52.5412	1.74179	33.72	1.741	39.31	1.7491	1.07
54.8963	1.67251	10.7	1.6684	15.83		
55.5181	1.65524	15.24	1.6554	11.79		
56.5525	1.6274	25.25	1.6246	20.6	1.622	0.47
58.1968	1.58528	12.75	1.583	11.43	1.5832	1.18
61.6212	1.50514	19.29		13.38	1.506	8
72.3782	1.30567	4.64		3.14		

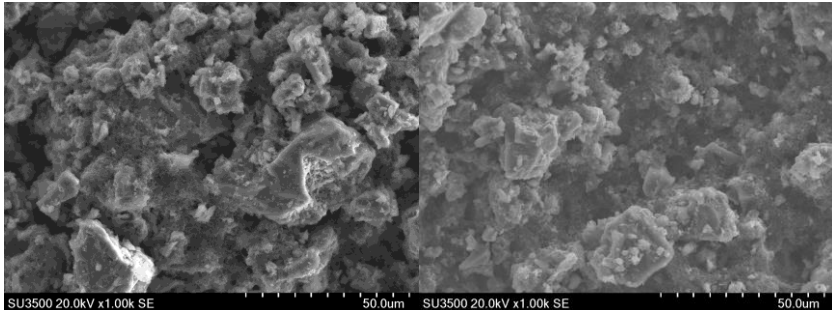
4.2 Analisis Morfologi dan Persebaran Partikel dengan SEM-EDX

Pengamatan morfologi dan distribusi partikel pada permukaan lembaran sampel dilakukan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pengambilan gambar dilakukan dengan perbesaran 100 – 10.000 kali perbesaran. Hasil karakterisasi lembaran LiFePO₄ doping ion Si dengan x=0, 0,05, 0,1, 0,15 dapat diamati pada gambar berikut.



(a)

(b)



(c)

(d)

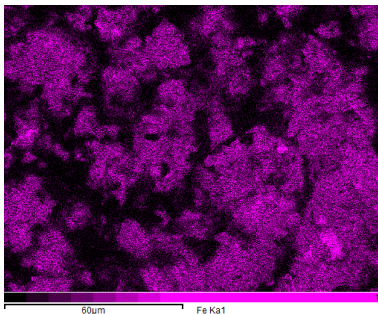
Gambar 4. 2 Hasil Karakterisasi SEM pada Lembaran Katoda
 $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ a) $x=0$ b) $x=0,05$ c) $x=0,1$ d) $x=0,15$

Pada gambar 4.2 dengan perbesaran 1000 kali dapat diamati ukuran butir yang tidak beraturan dan poros-poros yang dimiliki pada morfologi lembaran katoda. Pada gambar (a) lembaran katoda LiFePO_4 memiliki ukuran butir yang tidak homogen dan tidak tersebar merata. Adanya gumpalan-gumpalan mengindikasikan terjadinya aglomerasi, dimana beberapa partikel LiFePO_4 bergabung menjadi satu sehingga terlihat seperti partikel yang besar dan ukurannya tidak seragam pada tempat-tempat tertentu. Penambahan karbon sebagai pelapis pada butir-butir LiFePO_4 diharapkan dapat mempermudah difusi ion lithium. Namun, pada sampel ini tidak semua butir terlapisi. Terjadinya aglomerasi dikarenakan material LiFePO_4 , PVDF, dan Super P tidak tercampur merata pada proses pembuatan *slurry*. Sedangkan, gumpalan-gumpalan berwarna hitam mengindikasikan poros-poros dari lembaran katoda. Pada sampel ini, dapat diamati bahwa terdapat sedikit poros karena ikatan antarmuka *binder* dengan *filler* tidak optimal. Hal ini menyebabkan menurunnya kemampuan proses interkalasi dan de-interkalasi ion lithium yang dapat mempengaruhi kapasitas baterai.

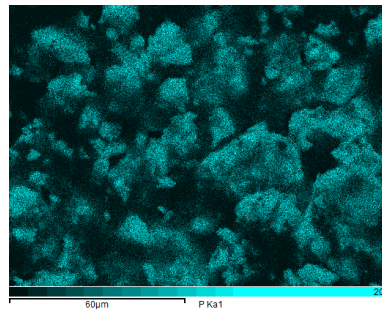
Sedangkan, pada gambar (b) untuk sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$ memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan sampel (a) walaupun ada beberapa spot yang terjadi aglomerasi dan persebaran butirnya tidak merata. Pada sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$ pengcoatingan karbon lebih merata dibandingkan sampel (a) dengan poros-poros yang terbentuk lebih banyak dibandingkan sampel (a).

Pada sampel $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$ yang ditunjukkan pada gambar (c) terjadi banyak butir yang beraglomerasi, dimana partikel-partikel $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$ bergabung menjadi satu dan ukurannya yang tidak homogen pada berbagai tempat. Namun, poros yang terbentuk lebih banyak dibandingkan sampel (b). Tetapi, karena banyak butir yang beraglomerasi akan mengakibatkan menurunnya kapasitas baterai yang juga disebabkan akibat pelapisan karbon yang belum sempurna.

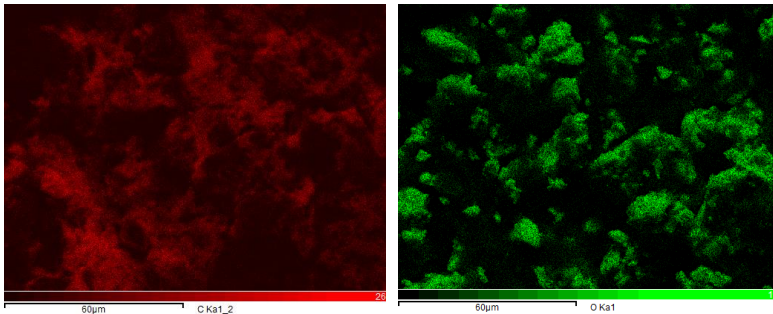
Jika diamati pada gambar (d) yang menunjukkan morfologi dari lembaran sampel $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$ ukuran butirnya lebih kecil dibandingkan sampel (c) dengan persebaran yang hampir merata. Partikel-partikelnya juga hampir semua terlapsi oleh karbon. Poros-poros yang terbentuk lebih banyak dibandingkan sampel-sampel sebelumnya yang dapat mempercepat laju difusi ion lithium.



(a)



(b)

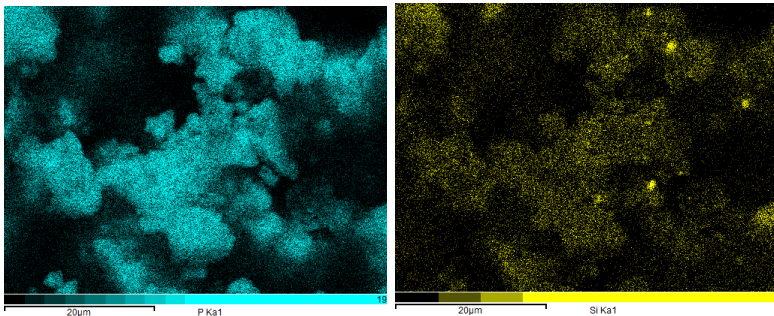


(c)

(d)

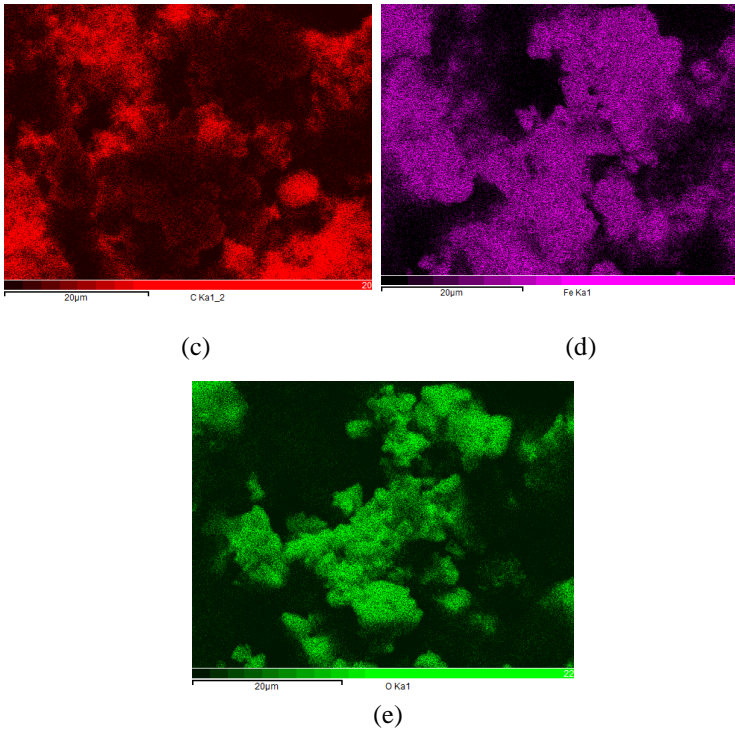
Gambar 4. 3 Hasil EDX Mapping Sampel LiFePO_4/C

Pada gambar 4.3 dapat diamati bahwa unsur-unsur pada sampel LiFePO_4/C dibedakan berdasarkan warnanya. Unsur Fe (besi) berwarna ungu, unsur P (phosphor) berwarna biru, unsur C (karbon) berwarna merah, dan unsur O (oksigen) berwarna hijau. Berdasarkan hasil mapping tersebut, unsur Fe dan P hampir tersebar merata. Sedangkan unsur karbon yang melapisi partikel LiFePO_4 tidak tersebar merata. Hal ini mengindikasikan bahwa pelapisan karbon tidak sempurna sehingga akan mempengaruhi difusi ion lithium.



(a)

(b)



Gambar 4. 4 Hasil EDX Mapping Sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$

Pada sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$ yang ditunjukkan pada gambar 4.4, unsur P ditandai dengan warna biru, unsur Si ditandai dengan warna kuning, unsur Fe ditandai dengan warna ungu, unsur C ditandai dengan warna merah, dan unsur O ditandai dengan warna hijau. Berdasarkan hasil mapping sampel tersebut dapat diamati bahwa unsur Fe mendominasi. Unsur Si tersebar merata mengikuti pola persebaran unsur P dan Fe yang menunjukkan bahwa unsur Si mensubstitusi unsur P yang menandakan bahwa pendopingan pada LiFePO_4 telah berhasil. Sedangkan, unsur C tersebar tidak merata namun, jika diamati pada gambar jumlah unsur C cukup banyak. Hal ini

mengindikasikan bahwa sampel tidak tercoating sempurna sehingga mempengaruhi kapasitas baterai.

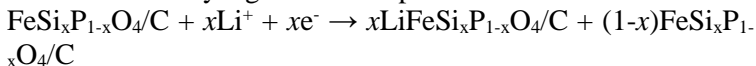
Jika dibandingkan dengan hasil mapping sampel $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$ dan $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$ (lihat dilampiran), unsur Si hampir tersebar merata yang mengindikasikan bahwa unsur Si berhasil mensubstitusi unsur P. Hanya saja pada sampel $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$ unsur Si tidak tersebar secara merata dibandingkan sampel sebelumnya sehingga mempengaruhi dimensi Kristal yang diamati melalui karakterisasi XRD. Hal ini berarti, pendopingan pada variasi sampel $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$ belum sempurna dimana terjadi penyusutan ukuran dimensi kristal. Sedangkan, untuk persebaran unsur C pada sampel $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$ lebih merata dibandingkan sampel $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$. Hal ini menyebabkan difusi ion lithium pada sampel $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$ lebih lambat sehingga kapasitas baterai yang dihasilkan akan sangat kecil.

4.3 Analisis Performa Siklik dengan *Cyclic Voltammetry* (CV)

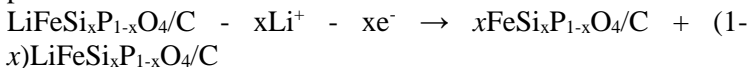
Hasil pengukuran data yang diperoleh pada pengujian ini berupa grafik hubungan antara tegangan (V) dengan arus uji (mA). Pengujian dilakukan dengan pemberian *scan rate* sebesar $50 \mu\text{Vs}^{-1}$ atau 0,1C dengan rentang tegangan *cut off* 2,5 – 4,2 Volt untuk setiap variasi. Pada grafik CV terdiri atas dua puncak, yaitu puncak oksidasi pada daerah arus positif dan puncak reduksi pada daerah arus negatif. Pada pengujian ini, $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ berperan sebagai katoda dengan Lithium Metallic yang berperan sebagai anoda dengan tegangan yang lebih rendah. Diantara katoda dan anoda dipisahkan oleh separator dengan elektrolit yang digunakan adalah LiPF_6 . Pada saat charging terjadi proses interkalasi (proses oksidasi) dimana ion-ion lithium bergerak dari katoda ke anoda. Sedangkan, pada saat discharging ion-ion lithium bergerak dari anoda ke katoda, yaitu terjadinya proses de-interkalasi (proses reduksi). Peningkatan arus puncak mengindikasikan terjadinya

reaksi oksidasi dan arus puncak yang menurun mengindikasikan terjadinya reaksi reduksi.

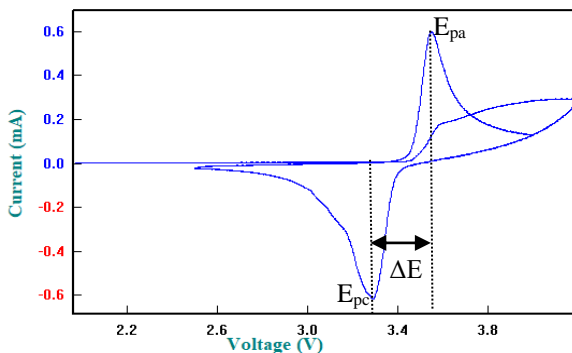
Pada proses discharging, terjadi reaksi reduksi pada katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$ yang memenuhi persamaan reaksi berikut.



dan pada proses charging, terjadi reaksi oksidasi dengan persamaan reaksi berikut.



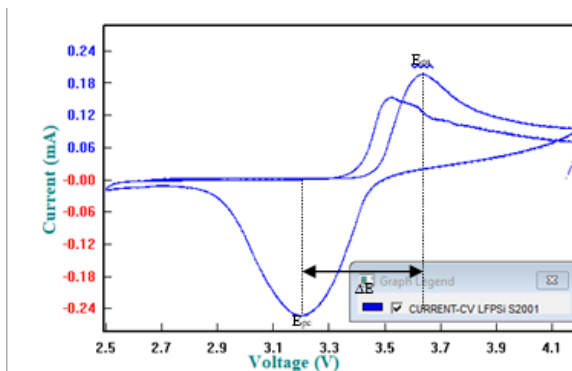
Hasil pengujian CV disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara tegangan dengan arus pengujian. Variabel yang ditampilkan adalah arus, tegangan, dan tegangan *cut off*. Dari grafik yang ditampilkan berikut ini, selisih potensial dari peristiwa oksidasi dan reduksi menunjukkan reversibilitas material baterai. Pola arus yang dihasilkan pada pengujian CV ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. 5 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV LiFePO_4/C

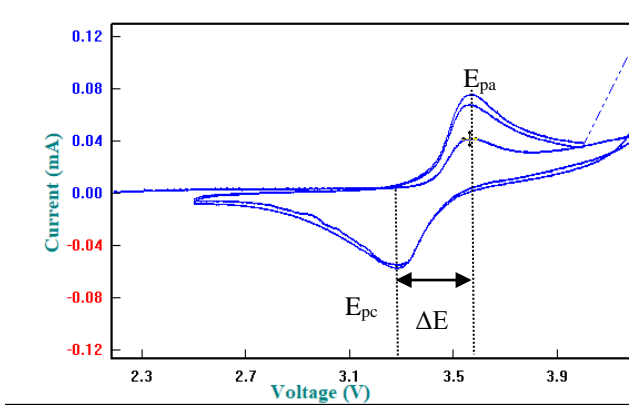
Proses oksidasi terjadi pada arus anodik. Berdasarkan gambar 4.5, dilakukan scan maju sehingga arus anodik meningkat dengan cepat ketika mencapai puncak tertinggi yaitu puncak oksidasi (E_{pa}) sebesar 3,53 Volt. Kemudian, arus menurun setelah terjadi oksidasi. Arah penyapuan berbalik negatif ketika scan balik untuk melakukan proses reduksi.

Proses reduksi terjadi pada arus katodik. Arus katodik meningkat dengan cepat ketika arus mencapai puncak reduksi (E_{pc}) sebesar 3,28 Volt. Setelah itu, arus katodik menurun setelah terjadi reduksi. Selisih potensial (ΔE) atau jarak interkalasi mengindikasikan cepat atau lambatnya transfer ion lithium dalam elektrolit dapat mempengaruhi besar kapasitas spesifiknya. Selisih potensial yang didapat pada variasi ini adalah 0,25 Volt.



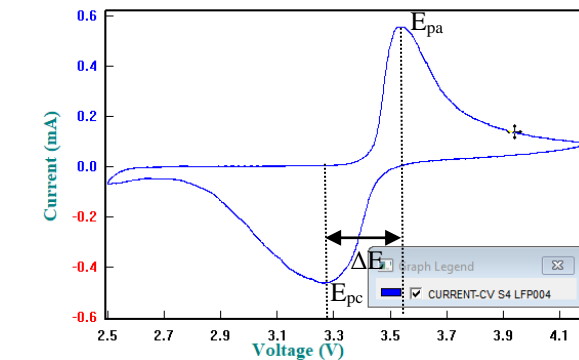
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV $\text{LiFeSi}_{0.05}\text{P}_{0.95}\text{O}_4/\text{C}$

Berdasarkan gambar 4.6, proses oksidasi terjadi ketika dilakukan scan maju sehingga arus anodik meningkat dengan cepat ketika mencapai tegangan maksimum (E_{pa}) sebesar 3,62 Volt. Arus anodik menurun setelah mencapai arus dan tegangan maksimum. Kemudian, arah penyapuan berbalik negatif ketika scan balik dan terjadi proses reduksi pada arus katodik. Arus katodik meningkat ketika mencapai tegangan minimum (E_{pc}) sebesar 3,20 Volt. Setelah itu, arus katodik menurun setelah terjadi proses reduksi. Jarak interkalasi (ΔE) antara puncak oksidasi dengan puncak reduksi sebesar 0,42 Volt.



Gambar 4. 7 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV $\text{LiFeSi}_{0.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_4/\text{C}$

Pada gambar 4.7, scan maju dilakukan untuk melakukan proses pengoksidasian. Arus anodik meningkat hingga puncak oksidasi (E_{pa}) sebesar 3,56 Volt. Arus menurun ketika telah terjadi oksidasi. Kemudian, arah penyapuan berbalik ke arah negatif untuk scan balik pada proses reduksi. Arus katodik meningkat hingga mencapai puncak reduksi (E_{pc}) sebesar 3,28 Volt. Arus katodik menurun setelah mencapai reduksi. Jarak interkalasi pada variasi ini sebesar 0,28 Volt.



Gambar 4. 8 Grafik Hubungan antara Arus dan Tegangan pada Pengujian CV $\text{LiFeSi}_{0.15}\text{P}_{0.85}\text{O}_4/\text{C}$

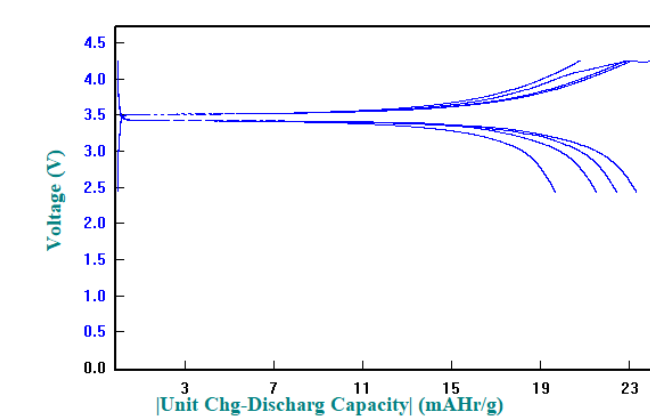
Pada gambar 4.8, scan maju dilakukan sehingga arus anodik meningkat ketika mencapai puncak oksidasi (E_{pa}) sebesar 3,53 Volt. Kemudian, arus anodik menurun ketika telah terjadi oksidasi. Arus katodik meningkat ketika dilakukan scan balik hingga mencapai puncak reduksi (E_{pc}) sebesar 3,26 Volt. Jarak interkalasi antara puncak oksidasi dan reduksi adalah 0,27 Volt.

Tabel 4. 3 Hasil Uji Cyclic Voltammetry (CV) $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{(1-x)}\text{O}_4/\text{C}$

x	Puncak		ΔE (V)	Working Voltage (V)
	E_{pa} (V)	E_{pc} (V)		
0	3,53	3,28	0,25	3,42
0,05	3,62	3,20	0,42	3,40
0,1	3,56	3,28	0,28	3,43
0,15	3,53	3,26	0,27	3,40

4.4 Analisis Kapasitas Muatan Spesifik dengan Charge/Discharge (CD)

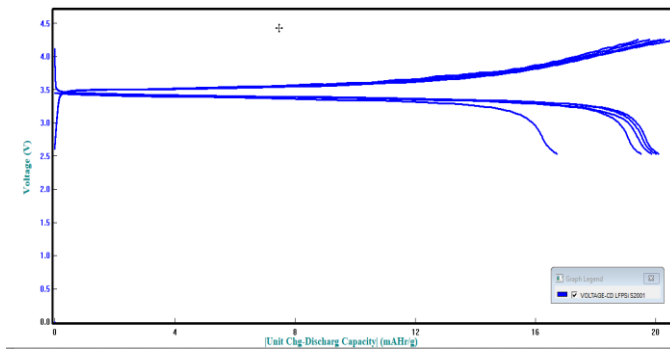
Pengujian *Charge/Discharge* (CD) dilakukan untuk mengetahui kemampuan suatu material aktif dalam menyimpan energi. Hasil pengukuran yang didapat disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara tegangan dengan kapasitas muatan spesifik yang diberi arus konstan dan tegangan *cut off* sebesar 2,5 – 4,2 Volt pada saat pengujian. Pada pengujian charge/discharge terjadi proses reaksi mekanisme reaksi baterai ion lithium pada saat proses *charging*, dimana ion-ion lithium berinterkalasi masuk ke *host* anoda. Sedangkan ketika proses *discharging* ion-ion lithium masuk ke *host* katoda atau mengalami proses de-interkalasi.



Gambar 4. 9 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD LiFePO₄/C

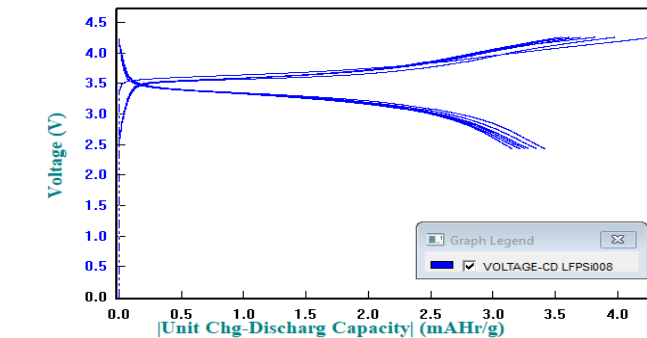
Pada pengujian *Charge/Discharge* terdapat tegangan *cut off*, yaitu tegangan awal saat sebelum diberi perlakuan (*charging* dan *discharging*). Pada proses *charging*, ion-ion lithium berpindah dari anoda ke katoda hingga mencapai tegangan maksimumnya sebesar 4,2 Volt. Kemudian, ion-ion berpindah dari katoda ke anoda hingga mencapai tegangan minimum sebesar 2,5 Volt pada proses *discharging*.

Pada siklus pertama, kapasitas muatan spesifik yang dihasilkan pada proses *charging* (Q_{sc}) sebesar 23,85 mAh/g dan pada proses *discharging* (Q_{sd}) sebesar 23,24 mAh/g. Nilai dari Q_{sd} lebih kecil daripada Q_{sc} mengindikasikan bahwa densitas power baterai lebih kecil dibandingkan densitas energinya. Sedangkan, terjadi penurunan kapasitas muatan spesifik pada siklus-siklus berikutnya.



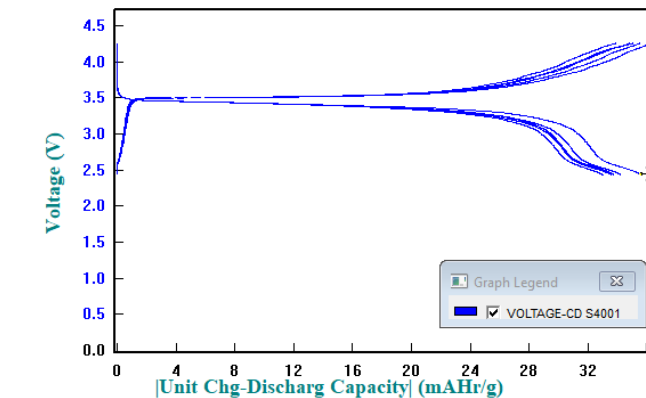
Gambar 4. 10 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD $\text{LiFeSi}_{0.05}\text{P}_{0.95}\text{O}_4/\text{C}$

Grafik hasil pengujian CD untuk sampel $\text{LiFeSi}_{0.05}\text{P}_{0.95}\text{O}_4/\text{C}$ menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan hasil dari sampel LiFePO_4/C . Siklus pertama, kapasitas muatan spesifik yang dihasilkan saat proses *charging* (Qsc) sebesar 20,62 mAh/g dan saat proses *discharging* (Qsd) sebesar 19,99 mAh/g. Selisih nilai yang relatif kecil antara Qsc dengan Qsd menunjukkan adanya kestabilan yang baik. Namun, terjadi penurunan kapasitas muatan spesifik pada siklus-siklus berikutnya.



Gambar 4. 11 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD $\text{LiFeSi}_{0.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_4/\text{C}$

Besar kapasitas muatan spesifik pada hasil pengujian CD sampel $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4/\text{C}$ lebih kecil dibandingkan dua sampel sebelumnya. Pada siklus pertama, kapasitas muatan spesifik pada saat *charging* adalah sebesar 3,26 mAh/g dan pada saat *discharging* sebesar 3,14 mAh/g. Terjadi peningkatan kapasitas muatan spesifik pada siklus kedua dan ketiga. Namun, pada siklus keempat dan kelima terjadi penurunan kapasitas muatan spesifik dimana hal ini menunjukkan ketidakstabilan material aktif katoda dalam proses *ion exchange*.

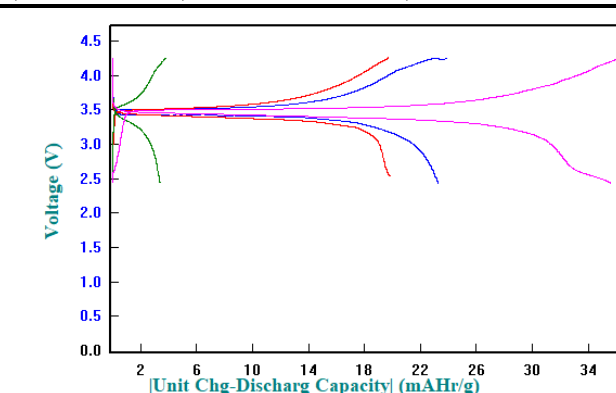


Gambar 4. 12 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$

Kapasitas muatan spesifik yang dihasilkan pada sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$ memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan variasi lainnya. Pada siklus pertama, kapasitas muatan spesifik yang dihasilkan pada saat proses *charging* (Q_{sc}) sebesar 36,27 mAh/g dan pada saat proses *discharging* (Q_{sd}) sebesar 35,51 mAh/g. Terjadi penurunan kapasitas muatan spesifik pada siklus-siklus berikutnya yang mengindikasikan ketidakstabilan pada proses *ion exchange* oleh material aktif katoda.

Tabel 4. 4 Hasil Uji Charge/Discharge (CD) $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{(1-x)}\text{O}_4/\text{C}$

x	V_{co} (Volt)	Kapasitas Muatan Spesifik Rerata	
		Q_{sc} (mAh/g)	Q_{sd} (mAh/g)
0	3,42	21,90	21,55
0,05	3,40	19,86	19,16
0,1	3,43	3,86	3,27
0,15	3,40	36,27	35,51



Gambar 4. 13 Hubungan antara Kapasitas Muatan Spesifik dengan Tegangan pada Pengujian CD untuk variasi $x = 0, 0,05, 0,1,$ dan $0,15$

Bila diamati pada gambar 4.13 yang menunjukkan hubungan antara kapasitas muatan spesifik dengan tegangan pada tiap variasi, tren dari nilai kapasitas muatan spesifik menunjukkan bahwa besar kapasitas muatan spesifik menurun seiring bertambahnya jumlah konsentrasi doping ion Si pada variasi $x = 0,05$ dan $0,1$. Namun, terjadi anomali dimana nilai kapasitas muatan spesifik pada variasi $x = 0,15$ meningkat. Hal ini dapat diindikasikan bahwa berdasarkan struktur kristal pada tiap variasi, semakin besar ukuran dimensi kristalnya maka semakin menurun nilai kapasitas muatan spesifiknya. Akibatnya, laju difusi ion lithium semakin menurun sehingga terjadi ketidakstabilan pada proses *ion exchange*.

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan judul “**Sintesis dan Karakterisasi Material Aktif Katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dengan Variasi Doping Ion Si ($0 \leq x \leq 0,15$)**” dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Material aktif katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ telah berhasil disintesis dengan metode *solid-state reaction*. Pendopingan ion Si terhadap ion P dengan variasi $x = 0, 0,05, 0,1$, dan $0,15$ berhasil didoping pada struktur LiFePO_4/C tanpa memengaruhi struktur olivine LiFePO_4 sesuai dengan parameter kisi.
2. Nilai kapasitas muatan spesifik dari material aktif katoda $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4$ dengan doping ion Si memiliki nilai yang paling besar pada variasi $x=0,15$.

5.2 Saran

Setelah dilakukannya penelitian ini maka diperoleh beberapa hal yang dapat disarankan untuk menjadi bahan perbandingan dalam penelitian yang akan lebih lanjut, di antara lain sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan coating carbon dengan bahan dasar gula.
2. Perlu dilakukan proses kalsinasi dan sintering dalam furnace dalam kondisi vacuum untuk mencegah adanya oksigen yang dapat mempengaruhi sampel.
3. Waktu penahanan pada proses coating carbon lebih lama.
4. Perlu dilakukan uji FTIR untuk mengetahui ikatan yang terjadi akibat hasil pendopingan ion Si ke situs PO_4^{3-} .

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, Askamal. 1997. "Pengembangan Material untuk Baterai Padat dengan Elektrolit Berbasis Perak." Serpong
- Abdullah, M. Khaerurijjal. 2009. "Karakterisasi Nanomaterial : Teori, Penerapan, dan Pengolahan Data." Bandung : Rezeki Putera
- Amin, Ruhul, Chengtian Lin, Jubo Peng, Katja Weichert, dkk. 2009. "Silicon-doped LiFePO_4 Single Crystals: Growth, Conductivity Behavior, and Diffusivity." *Advance Functional Materials* 1697-1704
- Araujo, Rafael B., Ralph H. Scheicher, J.S. de Almeida, A. Ferreira da Silva, Rajeev Ahuja. 2013. " First-Principles Investigation of Li Ion Diffusion in $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$." *Journal of Solid State Ionics*, Vol. 247-248, 8-14
- Chen, Z.Y., H.L. Zhu, S. Ji, R. Fakir, V. Linkov. 2008. "Influence of Carbon Sources on Electrochemical Performances of LiFePO_4 Composites." *Journal Solid State Ion*, Vol. 179 : 1810
- Gong, Chunli, Zhigang Xue, Sheng Wen, Yunsheng Ye, Xiaolin Xe. 2016. "Advanced Carbon Material/Olivine LiFePO_4 Composites Cathode for Lithium Ion Batteries." *Journal of Power Source*, Vol. 318 : 93-112
- Karthickprabhu, S. 2014. "Study of high Energy Olivine Phosphate Cathode Materials Doped with Transition Metals and Rare Earth for Lithium Iron Batteries." A Thesis of Department of Physics Kalasalingam University : India
- Klink, Stefan. 2013. "In-Depth Analysis of Irreversible Process in Lithium Ion Batteries." A Dissertation of Faculty of Chemistry and Biochemistry University of Bochum : Bochum
- Linden, David. 2001. "Handbook of Batteries." McGraw-Hill : USA. 3rd Edition

- Lu, Xia., Hsien-Chieh Chiu, Kirk H. Bevan, De-Tong Jiang, Karim Zagib. 2016. "Density Functional Theory Insights into The Structural Stability and Li Diffusion Properties of Monoclinic and Orthorhombic $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ Cathodes." *Journal of Power Resources*, Vol. 318 : 136-145
- Padhi, A.K., K.S. Nanjundaswamy, J.B. Goodenough. 1997. "Phospho-olivines as Positive Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries. *J. Electrochem Soc.* 1188
- Park, M., Zhang, M Chung, G.B. Less, A.M. Sastry. 2010. "A Review of Conduction Phenomena in Li-ion Batteries." *Journal of Power Resources*. Vol 195 : 7904 - 7929
- Satyavani, T.V.S.L., A. Srinivas Kumar, P.S.V. Subba Rao. 2015. "Method of Synthesis and Performance Improvement of Lithium Iron Phosphate for High Rate Li-Ion Batteries : A Review." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 178-188
- Sergi, F., A. Arista, G. Agnello, dkk. 2016. "Characterization and Comparison Between Lithium Iron P Phosphate and Lithium-Polymers Batteries." *Journal of Energy Storage*, Vol. 8 : 235-243
- Tarascon, J.M., M. Armand. 2001. "Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries." *Insight Review Articles* vol. 414 359-367
- Topracki, O., H.A.K. Topracki, L. Ji, Zhang. 2010. "Fabrication and Electrochemical Characteristic of LiFePO_4 Powders for Lithium-Ion Batteries." *Journal Powder and Particle*, Vol. 28 : 311-318
- Wieboldt, Dick, Ines Ruff, Matthias Hahn. 2015. "Techniques for Raman Analysis of Lithium-Ion Batteries." *Special Issues*, Vol. 30 Issue : 6
- Zaghib, Karim, Alain Mauger, Christian M. Julien. 2015. "Olivine-Based Cathode Materials". Springer International Publishing : Switzerland

- Zhang, P., C. H. Hu, dkk. 2012. "Structural Properties and Energetics of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ Polymorphs and Their Delithiated Products from First-Principles." PPCP, Vol. 14 7346 - 7351
- Zhao, Jian-Wei, Shi-Xi Zhao, Xia Wu, Hong-mei Cheng, and Ce-Wen Nan. 2017. "Double Role of Silicon in Improving the Rate Performance of LiFePO_4 Cathode Materials." Journal of Alloy and Compounds 849-855
- Zhao, Kejie. 2012. "Mechanics of Electrodes in Lithium Ion Batteries." Doctoral Dissertation, Harvard University
- https://id.wikipedia.org/wiki/Litium_hidroksida diakses pada tanggal 14 februari 2018 pukul 10:01 WIB
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(III\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(III)_oxide) diakses pada tanggal 14 februari 2018 pada pukul 14:16 WIB
- https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric_acid diakses pada tanggal 15 februari 2018 pada pukul 10:52 WIB
- https://id.wikipedia.org/wiki/Silikon_dioksida diakses pada tanggal 15 februari pada pukul 11:34 WIB
- https://id.wikipedia.org/wiki/Asam_asetat diakses pada tanggal 15 februari pada pukul 12:16 WIB

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

LAMPIRAN A

Perhitungan Komposisi Sampel

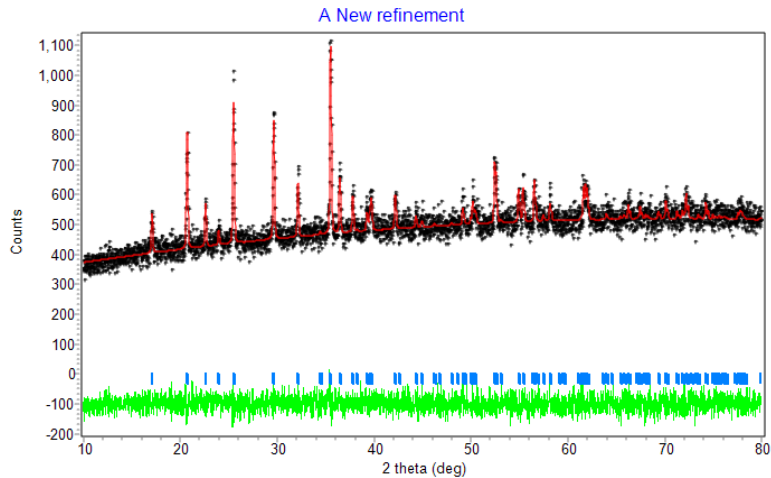
- Target : 15 gram $\text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_4/\text{C}$
- Bahan Baku :
 1. $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ teknis (Mr : 41,937 g/mol)
 2. H_3PO_4 , Merck, 85% (Mr : 97,95 g/mol)
 3. Fe_2O_3 teknis (Mr : 159,661 g/mol)
 4. $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, merck (Mr : 78,066 g/mol)
- Reaksi Target

$$\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}_{(s)} + \text{H}_3\text{PO}_{4(l)} + \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_{(s)} + \text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} \rightarrow \text{LiFeSi}_x\text{P}_{1-x}\text{O}_{4(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} + \text{O}_{2(g)}$$
- $$n \text{ LiFeSixP1 - xO4} = \frac{m \text{ target}}{\text{Mr LiFeSixP1 - xO4}}$$
- $$\begin{aligned} n \text{ LiFePO}_4 &= 0,095108 \text{ mol} \\ n \text{ LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4 &= 0,095196 \text{ mol} \\ n \text{ LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4 &= 0,09528 \text{ mol} \\ n \text{ LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4 &= 0,0953708 \text{ mol} \\ \rho \text{ H}_3\text{PO}_4 &= 1,71 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$
- Kebutuhan bahan baku/gas buang :
 Massa yang dibutuhkan =
$$\frac{\text{koef. bahan yg dibutuhkan}}{\text{koef. LiFeSixP1 - xO4}} \times n \text{ LiFeSixP1 - xO4} \times \text{Mr bahan}$$
- Kebutuhan bahan baku :

x	$\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$		H_3PO_4		$\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$		Fe_2O_3	
	Hitung (gram)	Ukur (gram)	Hitung (mL)	Ukur (mL)	Hitung (gram)	Ukur (gram)	Hitung (gram)	Ukur (gram)
0	3,9885	3,9885	6,41	6,4	0	0	7,5952	7,5976
0,05	3,9922	3,9923	6,09	6,1	0,3715	0,3715	7,5995	7,5995
0,1	3,9957	3,9968	5,77	5,8	0,7438	0,7441	7,6062	7,6062
0,15	3,9995	3,9995	5,46	5,5	1,1167	1,1169	7,6149	7,6144

LAMPIRAN B
Pengahulusan dengan Metode *Rietveld* Menggunakan *Rietica*

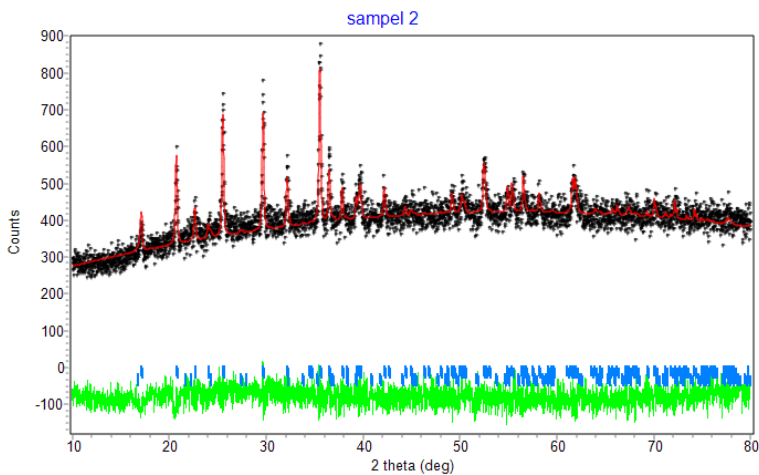
1. Hasil Rietica sampel LiFePO_4/C



+-----+									
Hist	Rp	Rwp	Rp(-b)	Rwp(-b)	Rexp	Durbin Unwght	Durbin Wght	N-P	
+-----+									
1	3.93	4.89	0.93	6.21	4.49	*****	1.872	4170	
+-----+									
SUMYDIF	SUMYOBS	SUMYCALC	SUMWYOBSSQ	GOF	CONDITION				
+-----+									
0.8117E+05	0.2066E+07	0.2061E+07	0.2066E+07	0.1187E+01	0.5681E+13				

DERIVED BRAGG R-FACTOR= 1.37

2. Hasil Rietica sampel $\text{LiFeSi}_{0,05}\text{P}_{0,95}\text{O}_4/\text{C}$

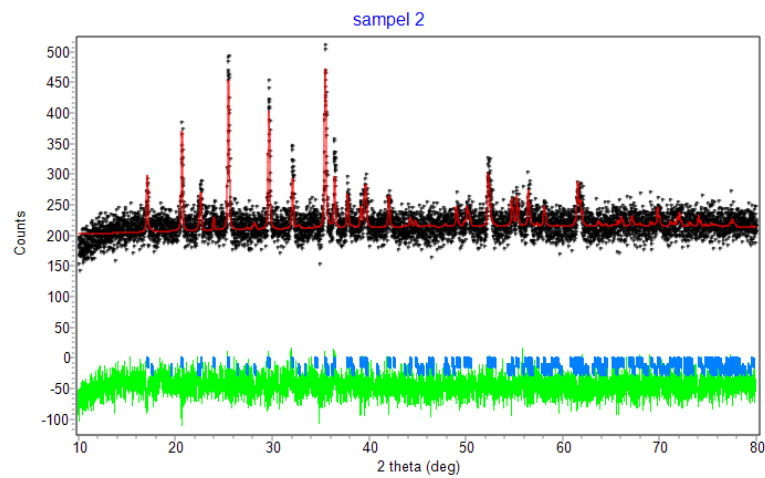


+	-----	+
	Hist	
	Rp	
	Rwp	
	Rp(-b)	
	Rwp(-b)	
	Rexp	
	Durbin Unwght	
	Durbin Wght	
	N-P	
	1	
	4.57	
	5.72	
	1.58	
	7.13	
	4.98	

	1.731	
	4168	
	SUMYDIF	
	SUMYOBS	
	SUMYCALC	
	SUMWYOBSQ	
	GOF	
	CONDITION	
	0.7678E+05	
	0.1680E+07	
	0.1675E+07	
	0.1680E+07	
	0.1318E+01	
	0.3155E+13	

DERIVED BRAGG R-FACTOR= 1.18

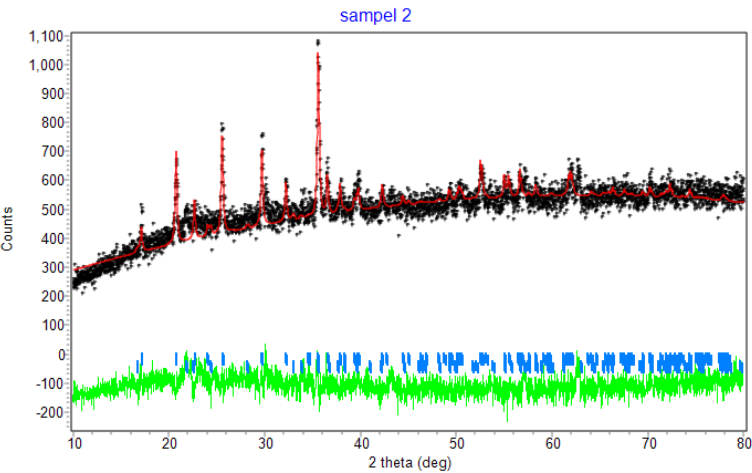
3. Hasil Rietica sampel $\text{LiFeSi}_{0.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_4/\text{C}$



+-----+									
Hist	Rp	Rwp	Rp(-b)	Rwp(-b)	Rexp	Durbin Unwght	Durbin Wght	N-P	
+-----+									
1	5.64	7.12	2.38	10.08	6.71	*****	1.771	6984	
+-----+									
SUMYDIF	SUMYOBS	SUMYCALC	SUMWYOBSQ	GOF	CONDITION				
+-----+									
0.8737E+05	0.1549E+07	0.1541E+07	0.1549E+07	0.1124E+01	0.5037E+13				
+-----+									

DERIVED BRAGG R-FACTOR= 1.87

4. Hasil Rietica sampel $\text{LiFeSi}_{0.15}\text{P}_{0.85}\text{O}_4/\text{C}$



+	-----	+
	Hist Rp Rwp Rp(-b) Rwp(-b) Rexp Durbin Unwght Durbin Wght N-P	
+	-----	+
	1 4.88 6.28 2.29 9.20 4.46 ***** 1.147 4168	
+	-----	+
	SUMYDIF SUMYOBS SUMYCALC SUMWYOBSQ GOF CONDITION	
+	-----	+
	0.1020E+06 0.2091E+07 0.2083E+07 0.2091E+07 0.1979E+01 0.4250E+13	
+	-----	+

DERIVED BRAGG R-FACTOR= 1.25

LAMPIRAN C
Data Tabel XRD

1. Data tabel XRD sampel LiFePO_4

eksperimen			LiFePO_4	
2theta	d	I/Io	d	I/Io
17.0767	5.19248	18.36	5.2193	28.35
20.7202	4.28694	50.71	4.3087	53.43
22.6106	3.93262	20.03	3.9512	15.92
23.9985	3.70823	9.54	3.7223	7.11
25.4821	3.4956	84.52	3.5053	76.83
29.5858	3.01942	61.83	3.0226	64.37
32.1521	2.78404	36.98	2.7918	28.89
35.4749	2.53052	100	2.5344	100
36.4503	2.46501	31.87	2.4701	28.48
37.798	2.38016	19.34	2.3846	18.88
39.2418	2.29586	14.61	2.3003	15.7
39.7209	2.26926	18.18	2.2761	17.54
42.1882	2.14208	17.51	2.1462	16.41
44.3645	2.04193	7.7	2.048	6.75
49.1593	1.8534	14.26	1.8565	13.01
50.2127	1.81696	21.16	1.82	17.11
52.4175	1.74561	35.49	1.7473	44.38
54.9555	1.67085	11.67	1.6751	14.48
55.381	1.65902	22.43	1.6304	18.5
56.5624	1.62714	17.14	1.6304	20.99
58.1543	1.58633	19.97	1.5886	10.57
61.6055	1.50549	18.99	1.5037	16.06
72.1904	1.30861	7.88	1.3098	3.69
74.2449	1.2774	11.25	1.2775	3.06

2. Data tabel XRD sampel $\text{LiFeSi}_{0.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_4$

eksperimen			LiFePO_4		$\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$	
2theta	d	I/Io	d	I/Io	d	I/Io
17.12	5.177	21.02	5.2004	27.59		
20.669	4.2939	39.97	4.3075	51.99		
22.65	3.922	19.8	3.9443	15.49	3.8976	1.26
25.457	3.4961	81.45	3.5001	74.75		
29.662	3.0093	62.81	3.0261	62.63		
32.072	2.7885	43.72	2.7967	28.11		
35.454	2.5298	100	2.5388	100		
36.402	2.4661	42.58	2.4762	27.71	2.4614	8.7
37.76	2.38	23.45	2.3891	18.37	2.3778	5.82
39.63	2.273	45.22	2.2789	23.6		
42.117	2.1437	26.96	2.1537	15.97		
49.011	1.8571	8.46	1.8598	12.66		
52.321	1.7472	52.16	1.75	43.18	1.7491	0.96
54.83	1.6729	17.24	1.6812	14.09	1.679	0.15
55.27	1.6608	15.09	1.6665	18		
56.464	1.6284	20.32	1.6277	20.43	1.622	0.42
61.557	1.5053	33.57	1.5095	34.75	1.506	0.25
69.87	1.345	11	1.3487	0.38		

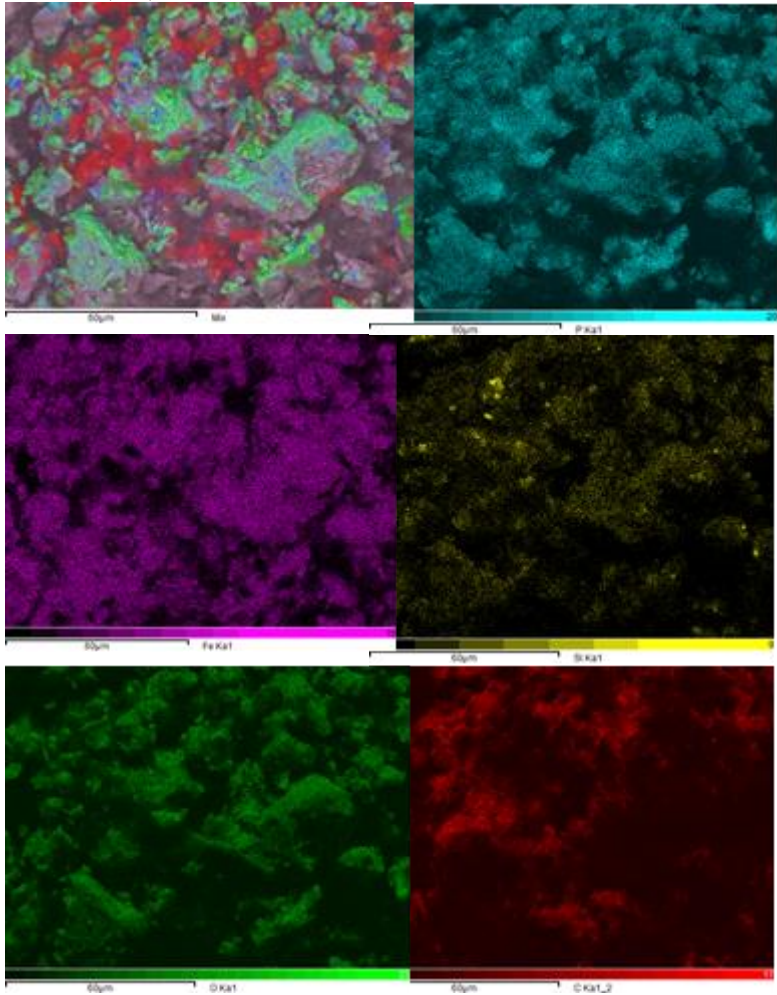
2. Data tabel XRD sampel $\text{LiFeSi}_{0.15}\text{P}_{0.85}\text{O}_4$

eksperimen			LiFePO_4		$\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$	
2theta	d	I/Io	d	I/Io	d	I/Io
17.1367	5.17446	19.17	5.0877	21.96		
20.7509	4.28067	43.99	4.2568	39.75		
22.6326	3.92885	12.97	3.9325	12.67	4.0725	6.97
25.5603	3.48508	57.8	3.4387	73.31		

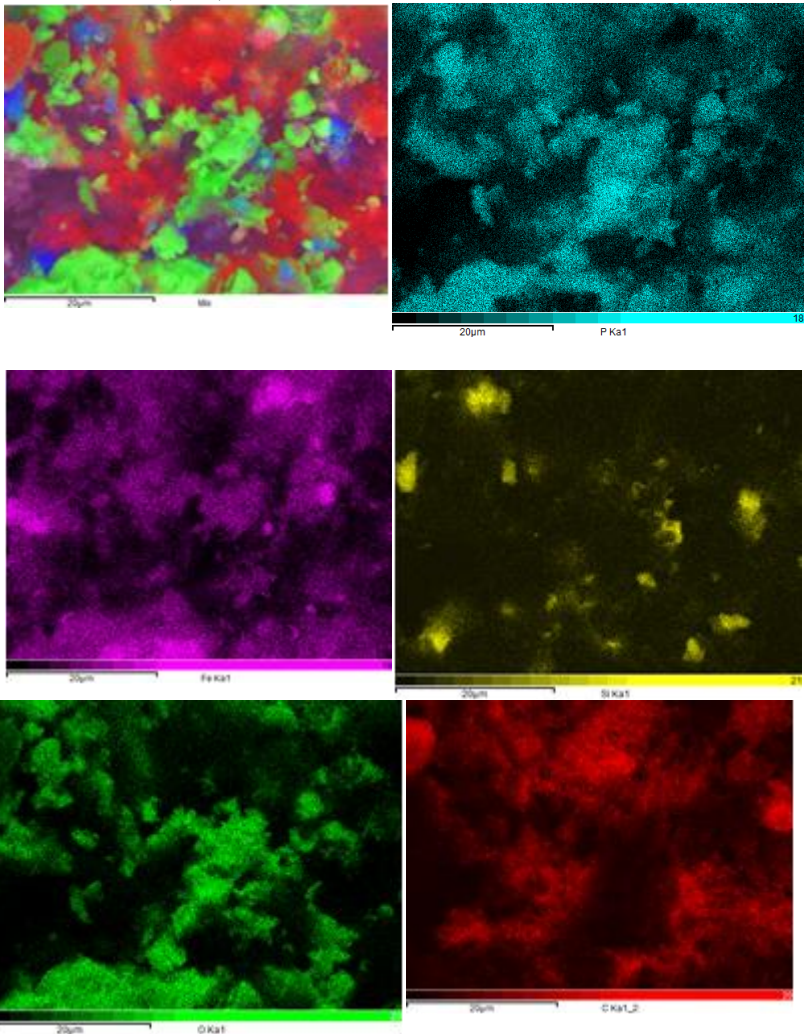
29.7098	3.00711	47.08	3.0069	56.26		
32.2302	2.77748	18.9	2.7663	17.63		
35.5592	2.52471	100	2.5136	100		
36.4727	2.46355	23.14	2.4912	18.93	2.4614	6.35
37.9032	2.3738	15.87	2.4111	16.14	2.3778	3.55
39.7953	2.26519	18.37	2.2747	20.32		
42.3403	2.13474	12.44	2.1072	14.44		
49.3699	1.84599	7.3	1.8464	9.73		
50.3385	1.81272	7.66	1.7966	9.19		
52.5671	1.741	17.87	1.739	29.83		
56.6411	1.62507	11.21	1.6315	11.23	1.622	3.87
57.1914	1.61073	10.59	1.6089	5.68		
62.0001	1.49685	16.46	1.4918	20.21		
62.768	1.48038	14.38	1.4905	3.91	1.4805	0.14

LAMPIRAN D
Hasil Pengamatan SEM-EDX

1. Hasil Pengamatan Mapping SEM-EDX sampel $\text{LiFeSi}_{0.1}\text{P}_{0.9}\text{O}_4/\text{C}$



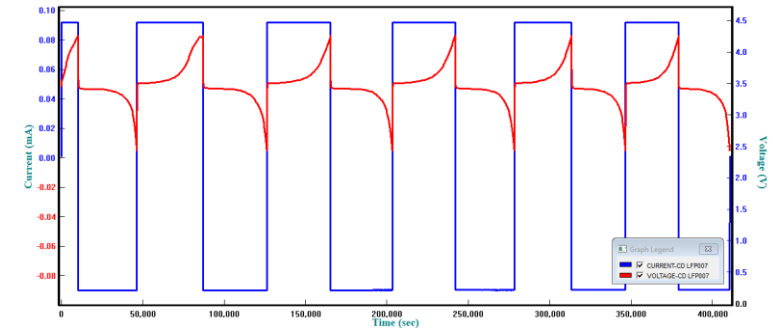
2. Hasil Pengamatan Mapping SEM-EDX sampel $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4/\text{C}$



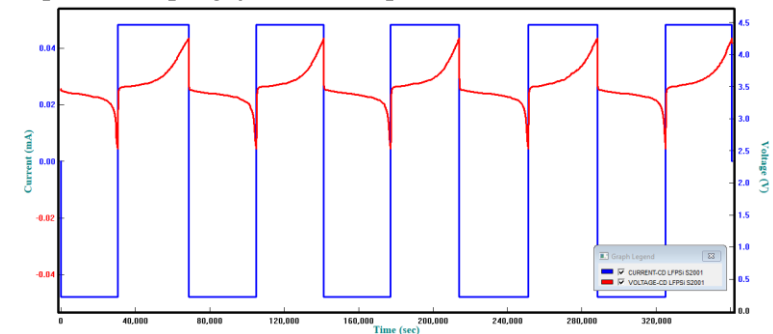
LAMPIRAN E

Hasil Uji Charge/Discharge (CD)

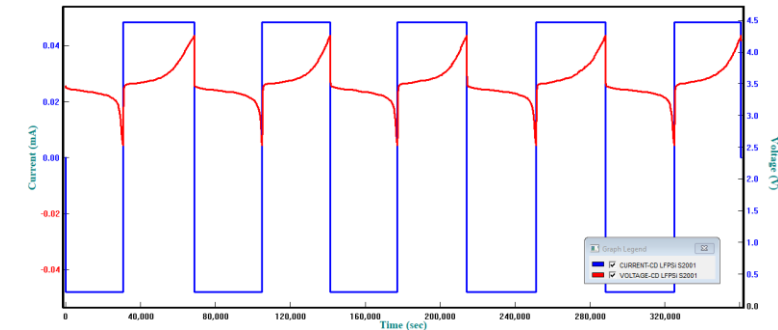
1. Grafik Hubungan antara waktu, arus pengujian, dan tegangan pada hasil pengujian CD sampel LiFePO_4



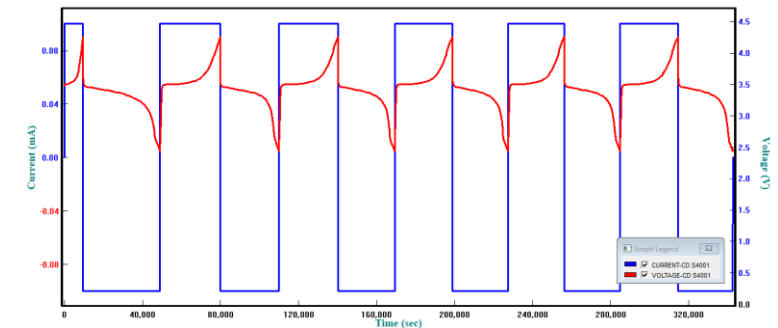
2. Grafik Hubungan antara waktu, arus pengujian, dan tegangan pada hasil pengujian CD sampel $\text{LiFeSi}_{0.05}\text{P}_{0.95}\text{O}_4$



3. Grafik Hubungan antara waktu, arus pengujian, dan tegangan pada hasil pengujian CD sampel $\text{LiFeSi}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{O}_4$



4. Grafik Hubungan antara waktu, arus pengujian, dan tegangan pada hasil pengujian CD sampel $\text{LiFeSi}_{0,15}\text{P}_{0,85}\text{O}_4$



LAMPIRAN F

Data ICSD

1. Data ICSD LiFePO₄

```
#-----
-
#$Date: 2016-02-14 16:26:36 +0200 (Sun, 14 Feb 2016) $
#$Revision: 176435 $
#$URL:
svn://www.crystallography.net/cod/cif/2/10/09/2100916.cif $
#-----
-
#
# This file is available in the Crystallography Open Database
# (COD),
# http://www.crystallography.net/. The original data for this entry
# were provided by IUCr Journals, http://journals.iucr.org/.
#
# The file may be used within the scientific community so long as
# proper attribution is given to the journal article from which the
# data were obtained.
#
data_2100916
loop_
  _publ_author_name
  'Streltsov, V. A.'
  'Belokoneva, E. L.'
  'Tsirelson, V. G.'
  'Hansen, N. K.'
  _publ_section_title
  ;
  Multipole analysis of the electron density in triphylite,
  LiFePO4,
  using X-ray diffraction data
```

```

;
_journal_issue          2
_journal_name_full      'Acta Crystallographica Section B'
_journal_page_first     147
_journal_page_last      153
_journal_paper_doi       10.1107/S0108768192004701
_journal_volume         49
_journal_year           1993
_chemical_formula_sum    'Fe Li O4 P'
_chemical_formula_weight 157.76
_symmetry_cell_setting   orthorhombic
_symmetry_space_group_name_Hall '-P 2ac 2n'
_symmetry_space_group_name_H-M 'P n m a'
_cell_angle_alpha        90
_cell_angle_beta         90
_cell_angle_gamma        90
_cell_formula_units_Z    4
_cell_length_a           10.332(4)
_cell_length_b           6.010(5)
_cell_length_c           4.692(2)
_cell_volume             291.40(10)
_diffrn_radiation_type   Mo
_diffrn_radiation_wavelength 0.71069
_exptl_absorpt_coefficient_mu 5.6
_exptl_crystal_density_diffn 3.6
_exptl_crystal_F_000     608
_cod_data_source_file     as0589.cif
_cod_original_formula_sum  'Fe1 Li1 O4 P1'
_cod_database_code        2100916
loop_
_atom_site_label
_atom_site_fract_x
_atom_site_fract_y
_atom_site_fract_z
Li .0 .0 .0

```

Fe .28222(3) .25 .97472(6)
 P .09486(5) .25 .41820(10)
 O(1) .09678(15) .25 .7428(3)
 O(2) .45710(14) .25 .2060(3)
 O(3) .16558(10) .04646(16) .2848(2)

2. Data ICSD Li₂FeSiO₄

```
#-----
-
#$Date: 2016-02-16 03:10:39 +0200 (Tue, 16 Feb 2016) $
#$Revision: 176453 $
#$URL:
svn://www.crystallography.net/cod/cif/7/02/18/7021867.cif $
#-----
-
#
# This file is available in the Crystallography Open Database
# (COD),
# http://www.crystallography.net/
#
# All data on this site have been placed in the public domain by
# the
# contributors.
#
data_7021867
loop_
  _publ_author_name
    'Yabuuchi, Naoaki'
    'Yamakawa, Yuto'
    'Yoshii, Kazuhiro'
    'Komaba, Shinichi'
  _publ_section_title
```

```

;
Low-temperature phase of Li2FeSiO4: crystal structure and a
preliminary
study of electrochemical behavior.
;
_journal_issue          9
_journal_name_full
'Dalton transactions (Cambridge, England : 2003)'
_journal_page_first     1846
_journal_page_last      1848
_journal_paper_doi       10.1039/c0dt01523g
_journal_volume         40
_journal_year           2011
_chemical_formula_sum    'Fe Li2 O4 Si'
_space_group_IT_number   31
_symmetry_Int_Tables_number 31
_symmetry_space_group_name_Hall 'P 2ac -2'
_symmetry_space_group_name_H-M  'P m n 21'
_cell_angle_alpha       90
_cell_angle_beta        90
_cell_angle_gamma       90
_cell_formula_units_Z    2
_cell_length_a          6.27758
_cell_length_b          5.35136
_cell_length_c          4.97208
_cell_volume            167.030
_pd_phase_name          LT-Li2FeSiO4
_cod_data_source_file    c0dt01523g.txt
_cod_data_source_block    VESTA_phase_1
_cod_depositor_comments  'Adding full bibliography for
7021867.cif.'
_cod_original_formula_sum 'Li2 Fe Si O4'
_cod_database_code       7021867
loop_
_symmetry_equiv_pos_as_xyz

```

```

'x, y, z'
'-x+1/2, -y, z+1/2'
'x+1/2, -y, z+1/2'
'-x, y, z'
loop_
  _atom_site_label
  _atom_site_occupancy
  _atom_site_fract_x
  _atom_site_fract_y
  _atom_site_fract_z
  _atom_site_thermal_displace_type
  _atom_site_B_iso_or_equiv
  _atom_site_type_symbol
Li 1.0 0.24615 0.33081 0.00692 Biso 1.000 Li
Fe 1.0 0.50000 0.82806 -0.00199 Biso 0.300 Fe
Si 1.0 0 0.83175 0.00943 Biso 0.600 Si
O1 1.0 0.21837 0.68523 0.89528 Biso 0.700 O
O2 1.0 0 0.12537 0.92156 Biso 0.700 O
O3 1.0 0.50000 0.17326 0.84733 Biso 0.700 O

```

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”

BIODATA PENULIS



Nindita Kirana lahir di Jakarta, 30 Desember 1995. Penulis telah menempuh pendidikan formal di MI Pembangunan UIN Jakarta, SMPN 11 Jakarta dan SMAN 70 Jakarta. Penulis melanjutkan pendidikan di Fisika ITS pada tahun 2014 terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 01111440000105. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif melakukan kegiatan pelatihan seperti LKMM Pra

TD FMIPA ITS 2015, LKMM TD Himasika ITS 2015, dan Lithium Battery Workshop oleh ASEAN COST-SCMST tahun 2017. Dalam bidang non akademik penulis juga aktif mengikuti organisasi baik di lingkup institut maupun luar institut, diantaranya Staff Magang Kementerian Perekonomian BEM ITS Kolaborasi 2014/2015, Staff Departemen PSDA UKM ITS Astronomy Club 2015/2016, Staff Departemen Event INDOCOR ITS Student Chapter 2015/2016, dan Anggota KOMMUN Regional Surabaya. Selain itu, dalam bidang akademik penulis aktif menjadi asisten dosen Fisika Dasar 1 dan 2, asisten laboratorium Fisika Dasar 1 dan 2, asisten laboratorium Fisika Bahan, pengajar privat fisika dasar 1 dan 2 di LBB FMIPA ITS dan Sang Juara School Surabaya.

Email : ninditakrn30@gmail.com

Hp : 082234893911

“ halaman ini sengaja dikosongkan ”